Ю. Е. ШЕЛЕПИН

ВВЕДЕНИЕ В НЕЙРОИКОНИКУ

Санкт-Петербург
2017

УДК 612.84 612.821 617.7
ББК 56.7
Ш42

Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда (проект № 14-18-02135 «Психофизиологические и нейролингвистические аспекты процесса распознавания вербальных и невербальных паттернов»)

Рецензенты:
заведующий лабораторией информационных технологий и математического моделирования Института физиологии имени И. П. Павлова РАН, кандидат технических наук *Чихман Валерий Николаевич*; научный сотрудник лаборатории физиологии зрения Института физиологии имени И. П. Павлова РАН *Пронин Сергей Вадимович*.

Ш42 Шелепин Ю. Е.
Введение в нейроиконику: Монография. — СПб.: Троицкий мост, 2017. — 352 с.: ил.

ISBN 978-5-6040327-1-8

Нейроиконика — наука об изображениях, их построении в мозге, восприятии, отклика мозга на предъявление зрительных сигналов, механизмах принятия решений об изображении объектов, планировании и организации целенаправленных действий в зрительном пространстве в реальной и виртуальной средах, построении целостной картины мира. В книге описаны исследования каналов осознаваемого и неосознаваемого зрительного восприятия.

Монография предназначена для физиологов, психологов, врачей и инженеров — специалистов в обработке изображений и создании систем искусственного интеллекта.

УДК 612.84 612.821 617.7

ББК 56.7

ISBN 978-5-6040327-1-8

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Одно из ключевых направлений развития информационных технологий — получение изображений окружающего мира, цифровая обработка и синтез изображений, их распознавание и понимание. Ощутимый прогресс в работе с изображениями привел к проходящей в последние десятилетия новой технологической революции. Задолго до того, как получение, обработка и синтез изображений стали доступными каждому человеку (а вычислительные машины были еще практически «слепы»), в середине XX века возникла новая наука — иконика.

Иконика — наука об изображениях, их построении, передаче, восприятии и распознавании [Мирошников, 1977–1987; Харкевич, 1953–1973; Aleksander, 1996]. В иконике удачно соединились результаты, полученные в оптике (с ее тысячелетней системой знаний и уникальным опытом практических приложений), в математике и в цифровых технологиях. Это грандиозный результат взаимодействия гуманитарных и естественных наук, философского понимания роли изображения в жизни человека.

В настоящее время развитие общества и технологий потребовало выделить в иконике новую междисциплинарную область — нейроиконику как науку о физиологических механизмах формирования изображений, их построении, восприятии, распознавании и понимании семантического значения изображений, включая исследование динамических карт деятельности мозга человека, обеспечивающего эти процессы. Оптические технологии, цифровые технологии обработки изображений, офтальмология, психофизиология зрения, цифровое картирование работы мозга, искусство (живопись, графика, архитектура, театр, кино и телевидение) можно системно объединять в целостную деятельность человека именно благодаря нейроиконике.

Предмет нейроиконики охватывает всю деятельность человека, в основе которой лежит изображение на сетчатке. Для обеспечения выживания и эффективной работы живого организма изображение должно быть представлено в мозге, распознано, а в результате принято решение. Принятие решений — это важнейший когнитивный процесс, завершающий обработку изображений в мозге и обеспечивающий эффективную деятельность человека. Он заканчивается либо внутренним выбором, с отсроченной

возможной реакцией (выбором для развития внутренней картины мира), либо немедленным запуском выбранного двигательного акта. Принятие решений охватывает огромный раздел информатики и информационных технологий, технологий управления. Это завершающий этап работы собственно зрительной системы, как живой, так и искусственной [Красильников, 1958; 1986; 2011]. Процесс принятия решения заключается в «оптимальном выборе» среди различных альтернативных возможностей [Saaty, 1980; 2005; 2008]. И этот выбор охватывает все виды осознанной, а в ряде случаев и неосознанной, деятельности человека. Формируется отношение наблюдателя к семантике данного изображения, запоминание. Деятельность живой системы, осознанного и неосознанного восприятия изображений сопровождается двигательными и вегетативными реакциями, необходимыми для выживания. На их соотношение указывал И. П. Павлов в своем обсуждении работ Э. Торндайка [Павлов, 1923].

Зрительная картина мира — это основа мышления человека, и именно на основании исследований работы мозга в зрительной среде можно понять основные конструкции и принципы работы мозга, на которых строятся поведение человека, взаимодействие людей, принципы управления человеком коллективами и технологическими процессами [Глезер, Цукерман, 1961; Глезер, 1995].

Информационно-психологическое осознаваемое и неосознаваемое воздействие на человека при восприятии зрительных стимулов охватывает практически все проблемы сенсорной физиологии и когнитивной психологии, психофизиологии, теории информации. Сенсорная нейрофизиология получила огромное развитие за последние сто лет. Из всех наук о человеке сенсорная физиология оказалась, вероятно, самой востребованной для обеспечения технологического прорыва в области коммуникаций, вычислительной техники, техники вооружений, управления поведением человека и понимания человеком окружающей среды.

Существующие и отобранные в эволюции сенсорные «интерфейсы» оказываются практически единственным способом общения человека с человеком и познания человеком окружающего мира, а для исследователя — основным путем изучения деятельности мозга. Связь «изображение — стимул» является ключом к закрытым для понимания конструкциям мозга, а изображения активности этих структур как откликов на стимулы — инструментом для изучения работы мозга. Отклики на зрительные стимулы реальной и виртуальной сред являются важнейшей частью деятельности человека, определяемой контекстом, потребностями и целью.

Мир звуков и мир изображений помогают человеку построить собственную картину мира. Мир звуков, обеспечивающих слуховую коммуникацию для человека, можно разделить на две части: восприятие (слух) и воспро-

изведение (крики, пение, речь). Аналогично разделен и мир изображений, возникающих на сетчатке: восприятие (зрение) и воспроизведение изображений, обеспечивающих зрительную невербальную коммуникацию (мимика и пантомимика человека и животных). Преобразование временного звукового сигнала в пространственный слуховой позволяет сопоставлять пространственную слуховую и зрительную пространственную информации в структурах мозга на одном «языке». Пространственную, «зрительную» организацию слухового восприятия изучают не только в физиологии [Rauschecker, 2001; 2009], но и в музыке [Мищенко, 2014]. Синтез изображений организмом человека или животных не столь очевиден, как синтез звуков. Он обозначается в другой терминологии и широко известен — это мимика, жесты, телодвижения, то есть средства невербальной коммуникации. Кроме того, человек владеет средствами построения изображений с помощью технических средств изобразительного искусства: от примитивных инструментов до цифровых методов синтеза изображений.

Лицо человека воспринимается сразу после рождения, хотя для понимания деталей мимики требуется длительная работа осознанного и неосознанного восприятия, обучения и памяти [Барабанщиков, 1990; 2012]. Обучение восприятию большинства изображений, за исключением понимания их семантического значения, происходит обычно без учителя. Но есть изображения, распознавание и понимание которых требует обучения с учителем, — это тексты. Возникновение речи, построение зрительных символов и знаков, а затем и письменной речи, создание техники синтеза звуков и синтеза изображений сопровождают всю историю человечества. Со времен Пифагора они тесно связаны с зарождением экспериментальных психофизических исследований и с развитием математики [Цит. по: Липс, 1903].

Важно отметить, что целостная картина мира во многом зависит от деятельности человека в конкретной бытовой, производственной или боевой ситуации. Достижение цели обеспечивает непрерывная деятельность человека. В разных условиях деятельности может доминировать та или иная сенсорная система и подключаться различные исполнительные механизмы [Павлов, 1923; Симонов, 1980]. Возможны срывы «непрерывной» деятельности человека, так называемые пароксизмы [Горбов, 1973]. Но главное то, что эта деятельность зависит от «сверхзадачи» по К. С. Станиславскому, или от «сверхцели» по И. П. Павлову, стоящей перед человеком [Станиславский, 1959; Павлов, 1923].

В данной книге рассмотрим нейрофизиологические механизмы восприятия локальной и глобальной, осознаваемой и неосознаваемой зрительной информации в обеспечении именно целенаправленной деятельности человека.

ГЛАВА 1

СВЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1.1 КВАНТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЛАЗА

Исходно для изображения необходим свет, хотя кодирование, передача и распознавание изображений могут происходить в нервной системе, телевизионных и вычислительных устройствах. Оптика — наука о свете, часть физики, связанная с изучением свойств видимого, инфракрасного и ультрафиолетового диапазонов электромагнитного спектра. Светом обычно называют видимый диапазон электромагнитного излучения с длиной волн от 780 до 380 нм. Границами видимого человеком света в обычных условиях являются инфракрасное и ультрафиолетовое излучения. Свет имеет квантовую природу. В силу этого поглощение в пигментах фоторецепторов происходит дискретными порциями. Энергия, переносимая одним квантом, равна:

$$\boldsymbol{E = h\nu},$$

где ν — частота излучения, а h — элементарный квант действия, универсальная константа, постоянная Планка $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ Дж • с.

С. И. Вавилов еще в 1930-х годах определил минимальное число фотонов (квантов света), необходимое для обнаружения сигнала в психофизических экспериментах. Затем в многочисленных и разнообразных условиях эти величины уточняли исследователи Голландии, Франции, США.

Считается, что для того, чтобы обнаружить сигнал, необходимо иметь на зрачке всего от 15 до 30 квантов [Вавилов, 1950; Островский, 2007; Тибилов, Шелепин, 2013; Bouman, Van der Velden, 1948]. Хотя для запуска отклика одного рецептора достаточно, чтобы попал на него всего один фотон [Baylor et al., 1979]. Различие в пятнадцать квантов для обнаружения наблюдателем и один квант для запуска отклика одного рецептора вызвано потерями в глазе и тепловыми шумами. Это означает, что природа почти достигла физического предела чувствительности, и только недавно матрицы современных видеоприемников достигли этого уровня чувствительности [Васильев, Тибилов, 2018; Нестеров и др., 2009]. Химическая среда фоторецептора находится в неравновесном метастабильном состоянии. С вероятностью около 0,7 один фотон запускает цепную реакцию, разрушающую это состояние. Всего один фотон запускает в действие 10^6 зарядов в фоторецепторе, как фотоумножитель.

Может быть, даже более впечатляющим, чем квантовая чувствительность глаза, является огромный динамический диапазон яркостей источников и освещенностей окружающей среды, при которых глаз может работать. Человек видит в диапазоне 15° порядков изменения яркости от ночного скотопического, палочкового до дневного фотопического, колбочкового зрения. Приспособление к такому диапазону обеспечивают изменение диаметра зрачка, процессы химической и нервной адаптации [Бызов, Кузнецова, 1969; Красильников, 1986; 1993; 1994; 1997; Фирсов, Говардовский, 1990; 2001]. Были созданы эффективные математические модели адаптации [Красильников, 1986; 1993; 1994; 1997], обеспечившие развитие техники приема изображений.

В результате разной чувствительности палочек и колбочек, а также действия механизма адаптации человек может работать с грубыми крупными изображениями при свете звездного неба, видеть достаточно мелкие детали при лунном свете и на залитом солнцем пляже в летний полдень. Работа при больших уровнях яркости источника и освещенности рабочего места для глаза опасна; опасно даже наблюдение светодиодов (начиная от маломощных указок) и использование ярких дисплеев.

Существующий парадокс зрения заключается в том, что свет — это не только основной источник информации для человека об окружающем мире, но и фактор риска, особенно в синей и ультрафиолетовой областях [Островский, 2007]. Защиту глаза человека частично обеспечивают естественные фильтры (хрусталик, липиды желтого пятна), удаляющие ультрафиолет и синюю часть спектра. Возможности естественной защиты сетчатки и даже роговицы от ожогов согласованы с солнечным светом лишь на уровне моря, на низких высотах, но опасность таится в ярких источниках, на высокогорье, на заснеженных и залитых солнцем склонах

гор — и тут необходима искусственная цветовая коррекция зрения [Зак, Островский 2010; Островский, 2005, 2006, 2007; Boulton, Ostrovsky et al., 1993; Zak, Ostrovsky, 2012]. Нечувствительность глаза к инфракрасному излучению является для человека как теплокровного существа жизненно важной. Тело как источник инфракрасного излучения «ослепляло» бы нас, делало бы слепыми к слабым источникам света.

1.2. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ. КАМЕРА-ОБСКУРА

И высокочувствительный прием фотонов фоторецепторами, и адаптация к разным уровням яркости направлены на восприятие изображений человеком. Чтобы получить оптическое изображение, надо иметь полое помещение: грот с узким входом, комнату с окном и деревянными ставнями с входным для солнечных лучей отверстием. Отверстие, как зрачок, необходимо для построения изображения. На противоположной отверстию стене в темной комнате (obscura camera, лат.) формируется изображение. Интерес к камере-обскуре проявляли Платон, Аристотель, Леонардо да Винчи, Дюрер, Ньютон и многие другие исследователи и художники. Чтобы увидеть сформированное отверстием изображение на противоположной стене, надо находиться в комнате и (желательно) иметь передвижной экран для подбора достаточно контрастного изображения. Камера-обскура может быть сделана в виде ящика, коробки с отверстием в одной из стенок (рис. 1.1).

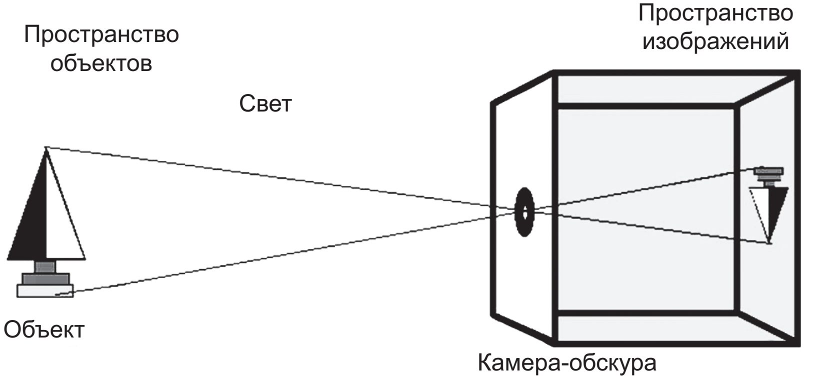


Рис. 1.1. Принцип действия камеры-обскуры

Можно получить изображение в небольшом ящике, если в его передней стенке сделать отверстие около 1 мм, а заднюю стенку заменить матовым полупрозрачным экраном. На этом экране можно карандашом обводить контуры изображения, построенного по законам прямой перспективы в соответствии с законами геомерической оптики. Так был создан прибор для обучения художников построению прямой перспективы. Позже для повышения яркости изображения отверстие в передней стенке, «зрачке» камеры-обскуры было дополнено линзовым объективом.

Эволюция камерного глаза в живой природе протекала похожим образом. У многоклеточных появляется своеобразная камера-обскура — углубление, на дне которого находятся светочувствительные клетки; у более сложных организмов появилась линза — хрусталик, а затем — роговица [цит. по: Вавилов, 1961; Дарвин, 1908]. Светочувствительный пигмент возник еще у одноклеточных организмов.

На рис. 1.2 представлено фотографическое изображение продольного полутонкого среза камерного глаза наземного моллюска, обладающего хру-

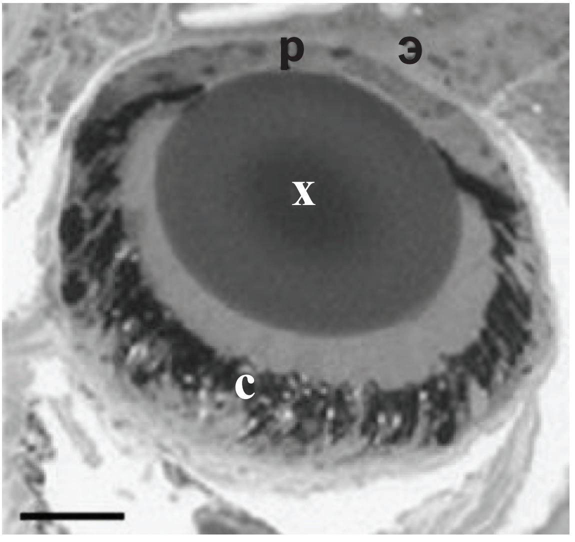


Рис. 1.2. Полутонкий срез камерного глаза наземного брюхоногого легочного моллюска *Perforatella incarnata Müller*, обладающего хрусталиком и роговицей [Шепелева, 2006 а]: *э* — эпидермис; *р* — роговица; *х* — хрусталик; *с* — сетчатка (масштаб: 50 мкм)

сталиком и роговицей [Шепелева, 2006 а; 2006 б). Онтогенез повторяет в общих чертах филогенез глаза. На 24-й день начинается формирование будущих глаз за счет выпячивания «камеры-обскуры» в нервной части эктодермы. Потом происходит вдавление поверхностной части эктодермы внутрь сформированного зачатка бокала глаза — начинается построение хрусталика. Некоторые части формирующегося глаза, такие как гиалоидная сосудистая система стекловидного тела, должны отмереть к восьмому месяцу, а образовавшиеся сосуды сетчатки еще не должны достигнуть ее края.

Эволюционный путь развития от простейших приемников света до глаза человека определяется не только естественным отбором — существуют ограничения, которые накладывают на формирование биологических структур фундаментальные свойства света. Возможные варианты нежизнеспособных комбинаций отсеивались со стороны естественного отбора и оптических ограничений. Камерный глаз на первых этапах эволюции имел конкурента — глаз фасеточный, присущий насекомым и ракообразным. У фасеточного глаза есть достоинство — широчайшее поле зрения, но и принципиальный недостаток — фундаментальные ограничения разрешающей способности. За прошедшие пятьсот миллионов лет эволюционировал именно камерный глаз. У человека этот глаз формирует высококачественное изображение.

В первом приближении для описания формирования изображения на сетчатке глаза достаточно законов геометрической оптики. Они позволяют рассчитать угловые размеры наблюдаемых объектов и размеры этих изображений на сетчатке (рис. 1.3). Так, изображение Солнца или Луны составляет для наблюдателя около 0,5 угл. град.; их приблизительные раз-

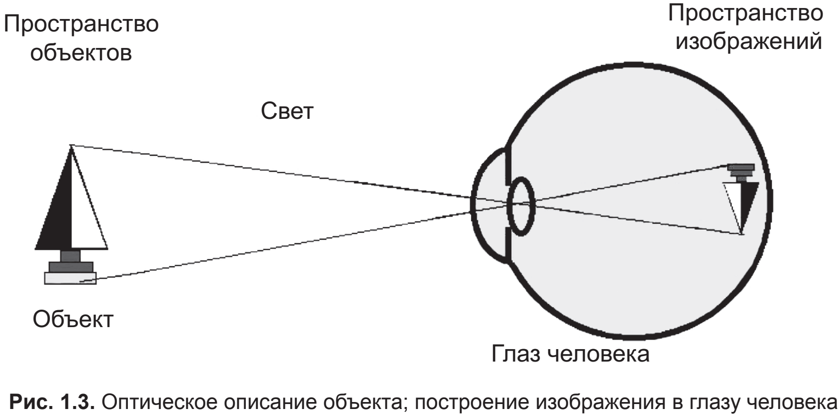


Рис. 1.3. Оптическое описание объекта; построение изображения в глазу человека

меры на сетчатке — около 0,15 мм, так как на сетчатке 1,0 угл. град. захватывает область в 0,3 мм. Размер колбочки колеблется в диапазоне 1 мкм–0,5 угл. мин. и даже меньше в фовеоле, в центре поля зрения. Поле зрения человека охватывает область около 160 по вертикали и 175 угл. град. по горизонтали.

Свет и оптические свойства глаза формируют резкое изображение на его задней стенке, на сетчатке. Передне-задний размер глаза человека, позволяющий сформировать хорошую картинку на сетчатке, составляет 24 мм при преломляющей силе хрусталика и роговицы в 58,6 диоптрии. При максимальной аккомодации вблизи преломляющая сила составляет уже около 70,6 диоптрий. Точность развития в онтогенезе размеров глаза и рефракции должны быть велики. Так, отклонение длины глаза всего на 1/24 приводит к искажениям изображения и для обеспечения эффективности многих видов деятельности человека необходима оптическая коррекция. Отклонение роста человека в популяции на 1/4 не влияет на эффективность его деятельности . Качество передачи изображений в глазу наиболее полно передает модуляционнная передаточная функция глаза в сочетании с функцией рассеяния точки (гл. 2). Пример размытия изображения из-за ухудшения (сужения) модуляционной передаточной функции за счет потери высоких пространственных частот дает изображение на рис. 1.4.

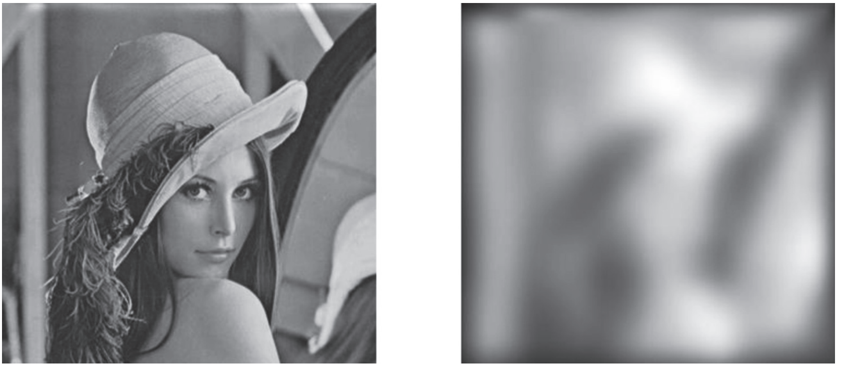


Рис. 1.4. Нормальное исходное изображение и размытое на сетчатке изображение при сильной близорукости

Для понимания формирования хорошего, сфокусированного изображения на сетчатке важно знать соотношение передне-заднего размера, преломляющей силы роговицы и хрусталика. Отклонения каждого из этих

параметров приводят к ухудшению изображения, которое может быть скорректировано с помощью очковой оптики, контактных линз и, при необходимости по медицинским показаниям, с помощью рефракционной хирургии. Сформированное на сетчатке изображение может ухудшаться из-за аберраций (преимущественно при большом зрачке), эти нарушения могут быть велики и требовать коррекции. Слабое ухудшение изображения из-за дифракции имеет большое физиологическое значение. Подробнее о структуре и качестве изображения, о способах его описания см. гл. 2–5.

Здесь укажем, что имеющиеся данные позволяют утверждать, что оптика глаза слегка недокоррегирует изображение. Это означает, что нежелательно совершенно точное согласование светящейся точки, одиночной звезды, и активация одного рецептора. Необходим низкочастотный пространственно-частотный фильтр, обеспечивающий размытие точки. Размытие позволяет избежать возникновения эффекта муара, шума дискретизации [Красильников, 1986]. Кроме того, слабое размытие светящейся точки на сетчатке, описываемое функцией рассеяния точки, позволяет смешать несколько рецепторов, настроенных на разную длину волны, под одной функцией рассеяния [Кемпбелл, Шелепин, 1990]. В результате смешение цветов происходит в оптическом пространстве. Это использовали мастера мозаик, пуантилисты и инженеры при разработках первых поколений цветных телевизоров и дисплеев. Если взглянуть на люминофор экрана старых цветных электронно-лучевых трубок через увеличительное стекло, ясно видны красно-зелено-синие грозди. Эти триады смешивались под колоколом функции рассеяния точки. На современных мониторах для повышения их разрешающей способности люминофоры собраны в один пиксель и расположены в нем последовательно. Принципы согласования оптического описания и описания в нейронной сети зрительной системы человека более подробно рассмотрены в гл. 2.

Необходимо сказать, что формирование изображения в круглом глазу на сферической сетчатке имеет ряд несомненных достоинств. Во-первых, вращение глаза происходит вокруг своей вертикальной оси за счет системы глазодвигательных мышц, век и положения в глазнице. Сформированное изображение на сетчатке глаза неподвижно относительно сцены, если вращать глазами, сохраняя неподвижность головы (аналогично, если вращать горизонтально круглый стеклянный или пластмассовый шарик вокруг вертикальной оси, изображение возле его поверхности не сдвигается). При вращении глаза и неподвижной голове изменяются только различные области сетчатки относительно стоящего изображения. Области сетчатки неоднородны. Происходит перемещение фовеа, зоны с повышенной разрешающей и распознающей способностью, по неподвижному изображению пространства. Перемещая голову влево и вправо, сохраняя

неподвижность глаза, наблюдатель ясно видит резкое изменение изображения. Эти различия определяют восприятие сцены наблюдателем. Рассмотрим подробнее условие восприятия изображения при неподвижной голове и вращении глаз по горизонтали вокруг вертикальной оси. Например, при чтении текста видим неподвижными комнату, стол, книгу, строки, но при движении взора вдоль строки как бы проявляются четкими и становятся читаемыми отдельные фрагменты в несколько букв по строке. Меняющееся четкое видение по строке обеспечивает смещаемая маленькая центральная часть сетчатки, а для получения ощущения неподвижности строки, страницы книги и всего помещения необходим механизм низкочастотного описания сцены, практически однородный по всей поверхности сетчатки. И этот механизм существует в виде пространственных низкочастотных каналов. На окончательном этапе необходимо согласование этой низкочастотной информации с другой независимой воспринимающей координатной системой, аналогом гироскопа, а именно — с работой вестибулярного аппарата. Рассогласование с информацией, поступающей от вестибулярного аппарата и от низкочастотного описания сцены рецептивными полями сетчатки, приводит к тягостным последствиям в условиях невесомости, укачивания или при болезни Меньера. Более того, это рассогласование возникает при чтении в автомобиле или автобусе, особенно на плохой дороге, когда к зрительно-вестибулярным проблемам добавляется вибрация самого текста.

Благодаря формированию изображения на сетчатке созданы предпосылки для перехода от оптического описания окружающего пространства и расположенных в нем объектов к описанию этой сцены в нейронных сетях. Это описание согласовано с описанием в других сенсорных и управляющих движением системах.

Возвращаясь к теме камеры-обскуры, отметим, что для оптики, живописи и физиологии зрения ее в какой-то степени можно сравнить с монохордом для акустики, физиологии слуха, теории музыки, развития «музыкальных технологий». Камера-обскура послужила основой для создания «зрительных технологий», понимания геометрии построения изображений и работы глаз, названых по аналогии камерными. Недостатки камеры-обскуры — малое количество света и плохое разрешение оптики — компенсировали линзами. Камера-обскура с линзой послужила прообразом фото- и кинокамер, самых распространенных видеотехнологий. В эволюции камерного глаза появились хрусталик и роговица, так как этого требовали природа света и эффективность выживания. Увеличение размера глаза в эволюции определяли помимо свойства света соотношение широкого поля зрения и высокой остроты зрения для увеличения информационной пропускной способности.

1.3. КАМЕРА-ОБСКУРА И ОТКРЫТИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СВЕТА

Исаак Ньютон в затемненной комнате (камере-обскуре), с отверстием в деревянных ставнях, пропускающим солнечный луч, применил призму для получения радуги на экране. К тому времени уже знали, что призма формирует радугу, но считали, что она «окрашивает» белый цвет. Ньютон предположил, что призма разлагает, пространственно разносит белый свет на составляющие. Для доказательства он поместил в изображение радуги вторую, перевернутую призму и впервые «собрал» радугу в белый свет — на экране появилась белая линия. Новизна открытия состояла в том, что «сборка» радуги в белый свет второй призмой позволила понять функцию первой призмы — пространственное разделение света на составляющие, «простые» цвета. «Сборку» радуги снова в белый свет Ньютон сделал еще одним очень наглядным способом — с помощью собирающей линзы, помещенной в изображение радуги вместо второй призмы. Ньютон доказал, что первая призма разлагает белый свет на составляющие, а не окрашивает его как фильтр. Эффект разделения белого света и последующего слияния воспринималось публикой почти как «приведение». Он ввел понятие спектра и создал спектроскоп. Этот прибор оказался одним из важнейших для построения научной картины мира. Разделение света на спектральные составляющие предполагало наличие раздельных приемников в глазу. Следующая задача заключалась в определении их числа. Судя по записям в его знаменитой «Оптике», Ньютон колебался, рассуждая о числе приемников.

В начале XVIII века в Петербургской академии наук тоже была темная комната, и тоже с отверстием в ставнях, с призмами и экраном для изучения разложения света по Ньютону. Сохранился рисунок этой комнаты, изящно выполненный академиком Крафтом [Вавилов, 1927, цит. по изданию 1961]. Вероятно, именно в этой темной комнате М. В. Ломоносов проводил свои исследования по смешению цветов. Ломоносов предположил существование всего трех «материй», чувствительных к частицам света, разного размера и напоминающих по своим соотношениям ядра, пули и дробь (по современной терминологии, трех пигментов в трех типах колбочек с настройкой на разные длины волн), которые обеспечивают в результате дальнейших преобразований входных сигналов распознавание всего цветового разнообразия [Mollon, 2006].

Три типа рецепторов глаза, обеспечивающих дневное зрение человека, находятся в длинноволновой «красной» области с пиком 570 нм, средневолновой «зеленой» области с пиком 544 нм и «синей» коротковолновой с пиком 443 нм.

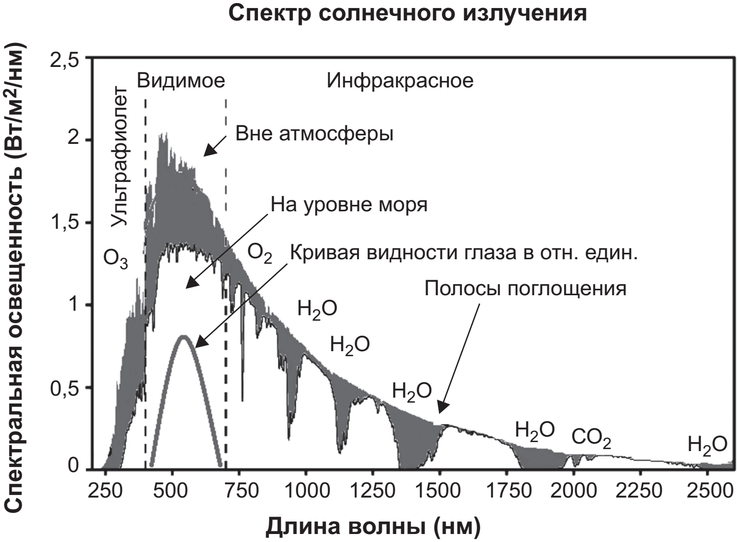


Рис. 1.5. Энергетический спектр солнечного излучения до его входа в атмосферу (серая заливка) и на уровне моря при отсутствии облачности (белая заливка); провалы на белой заливке — полосы его поглощения атмосферой Земли. Около каждой полосы поглощения указаны поглощающие газы [Ортенберг, Трифонов, 1990]. Серая кривая дневной чувствительности глаза с пиком на 555 нм дана в относительных единицах, не связанных с размерностью оси ординат

На рис. 1.5 представлена спектральная освещенность (spectral irradiance). Глаз человека как раз и использует пиковую область спектра солнечного излучения, и именно ему соответствует максимум чувствительности глаза. Это обстоятельство позволило С. И. Вавилову назвать глаз человека солнечным.

«Солнечность» глаза связана с «солнечностью» хлорофилла. Видимый участок электромагнитного спектра по обоим краям совпадает с двумя пиками поглощения света хлорофиллом для накопления солнечной энергии в химических соединениях, без которых жизнь на Земле была бы невозможной (близки к штриховым вертикальным линиям на рисунке). Максимум отражения от молекул хлорофилла происходит в области 555 нм, воспринимаемой человеческим глазом как зелено-желтый цвет растительности.

ГЛАВА 2

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ОСТРОТА ЗРЕНИЯ КАК ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

2.1. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ОСТРОТА ЗРЕНИЯ

Разрешающая способность — термин, используемый в физике, оптике, в технике для оценки оптических, оптоэлектронных и других систем. В физиологии его чаще применяют для характеристики отдельных звеньев зрительного анализатора — оптики глаза, мозаики рецепторов, рецептивных полей нейронов различных уровней. Для описания разрешающей способности оптических и физиологических механизмов зрительной системы удобнее пользоваться угловыми значениями. Нормой разрешающей способности оптики глаза и остроты зрения человека принято считать значение, равное 1 угл. мин. Так, еще в XVII веке Роберт Гук измерил пороговое для наблюдения угловое расстояние между близко расположенными друг от друга звездами. Разрешающая способность глаза оказалась приблизительно равна 1 угл. мин. Однако разрешающую способность зрительной системы, и живого глаза в частности, чаще всего измеряют косвенно, психофизическими методами. Результат этих измерений — острота зрения.

Острота зрения является основной характеристикой функциональных возможностей зрительной системы и тесно связана с разрешающей спо-

собностью зрительной системы. Зачастую эти термины используют как синонимичные. Однако есть некоторые отличия. Острота зрения — это относительная величина разрешающей способности данного человека к разрешающей способности здорового испытуемого. Практически измеряют отношение расстояния, при котором испытуемый видит тест, например размер разрыва в кольце Ландольта, к расстоянию, при котором этот разрыв равен одной угловой минуте. Отношение записывают в виде дроби обыкновенной или десятичной. В России используют десятичные дроби для оценки данного отношения. Это отношение разрешающей способности к «норме» в клиническую практику ввел Снеллен.

Разрешающая способность в терминах пространственных частот — это самая высокая пространственная частота, которая содержится в изображении при максимальном контрасте, или минимальный элемент изображения, содержащийся в изображении, передаваемый оптикой глаза и сетчаткой в мозг человека и различимый человеком. Разрешающая способность измеряется в цикл/угл. град. как верхняя различимая, или граничная пространственная, частота, или в угл. мин. как размерах объекта, различимых человеком.

Измерение остроты зрения в подавляющем большинстве случаев производится путем психофизических измерений на основании регистрации ответа испытуемого. Острота зрения определяется анатомической конструкцией глаза и звеньев зрительной системы, однако на величину остроты зрения наблюдателя влияет функциональное состояние различных отделов зрительного анализатора (внимание), общее функциональное состояние испытуемого, знание тестов. Весьма важным является выбор критерия, на основании которого испытуемый принимает решение о тесте, а врач судит об остроте зрения пациента.

В обычном определении острота зрения — это мера способности зрительной системы обнаруживать, различать и узнавать объекты минимального размера. Это определение напоминает определение разрешающей способности. Но использование слов «обнаруживать, различать и узнавать объекты» на практике означает применение разных критериев и использование разных механизмов зрительной системы. Например, мы стоим на трамвайной остановке, ждем трамвай № 6; вначале видим приближающейся трамвай и окошко для номера, потом обнаруживаем пятно в этом окне, затем при дальнейшем приближении трамвая различаем размытую фигуру и узнаем номер трамвая; дистанции распознавания номера и дистанция обнаружения пятна значительно отличаются друг от друга. Обнаружение зависит от того, когда первая гармоника в спектре изображения достигнет порога обнаружения. Распознавание зависит от того, когда контраст высокой пространственной частоты (определяющей форму, требуе-

мую для данной задачи распознавания) в спектре изображения достигнет порога обнаружения.

Рассмотрим другой пример. Минимальный размер объекта — это звезда, «бесконечно» малая точка. Обнаружение светящейся точки звезды при эмметропической рефракции зависит от яркости и тем самым только контраста светящейся звезды. Больше яркость — выше и шире функция рассеяния точки на сетчатку. Поэтому Гиппарх шкалировал звезды по «величине», хотя в действительности это для наблюдателя точки в отличие от планет. Более яркие звезды имеют большую функцию рассеяния и кажутся наблюдателю больше. Яркие ночью, звезды «гаснут» с рассветом. Светлеющее на рассвете небо (фон для звезд) уменьшает контраст звезд. С восходом звезды «гаснут», так как их контраст становится меньше 2 %. Не хватает контраста для преодоления порога обнаружения. Однако если человек способен обнаружить периодичность решетки на сером фоне, это означает, что он может различить кадр с однородным серым фоном от кадра с аналогичным серым фоном, еще промодулированным на каком-то участке решеткой, предельной для различения пространственной частотой.

В основе характеристик остроты зрения человека — структурно-функциональная организация отдельных звеньев зрительного анализатора, которая определяет их разрешающую способность, и системы принятия решений об объекте в зависимости от поставленной задачи (например, обнаружить объект или его распознать, а если распознать, то с какой точностью). Применяемые в широкой клинической практике тестовые изображения показаны на рис. 2.1.

В приведенной таблице содержатся строки колец Ландольта (всего двенадцать строк), размер которых уменьшается сверху вниз. Слева указано расстояние D (в метрах, м), с которого эти кольца должен видеть человек с нормальным зрением (50,0 м для верхнего ряда; 2,5 м для нижнего). Справа каждой строки указана величина V (в условных единицах) — это острота зрения при чтении знаков с расстояния 5 м (0,1 — если глаз видит только верхний ряд; 2,0 — если виден нижний ряд). Нормальное зрение (1,0) — когда человек видит каждым глазом с расстояния 5 м десятую строку. Величину остроты зрения для разных расстояний можно рассчитать по формуле Снеллена:

$$\boldsymbol{V = d/D},$$

где V — острота зрения; d — расстояние в метрах, с которого проводится исследование; D — расстояние в метрах, на котором нормальный глаз видит данный ряд.

Острота зрения человека зависит от разрешающей способности оптики глаза (как уже было указано, измеряемой в угловых единицах — угл. мин., или в пространственных частотах — цикл/угл. град.) и определяемой реф-

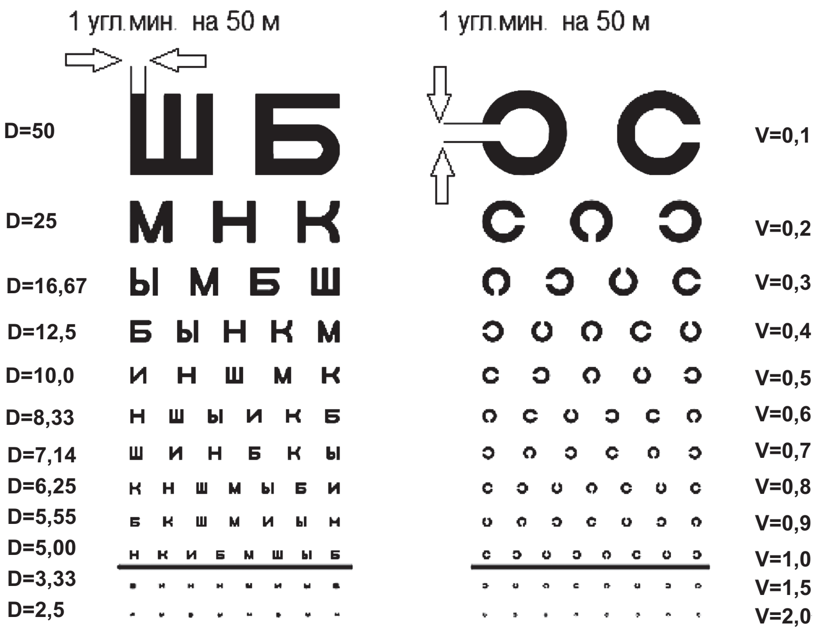


Рис. 2.1. Таблица для проверки остроты зрения Головина [Головин, 1925; Головин, Сивцев, 1926; Кравков, 1950]

ракцией и функцией рассеяния точки на зрачке, аберрациями и плотностью упаковки рецепторов, их размером и функциональным состоянием, а также зависит от конструкции и функционального состояния нейронных звеньев зрительного анализатора. Функциональное состояние каждого уровня зрительной системы определяется пороговой чувствительностью, которая ограничена внутренним шумом. При эмметропической рефракции на величину остроты зрения влияют оптические и геометрические свойства теста — яркость фона, контраст, длительность предъявления теста, цвет и цветовой контраст и, наконец, форма (геометрия) тестового изображения и его окружение.

Все эти условия важны, поэтому в клинической практике большое внимание уделено стандартизации измерения остроты зрения при наблюдении неподвижных черно-белых изображений на однородном фоне с высоким контрастом, близким к 1,0. Стимулы предъявляют при освещенности таблиц, равной 700 лк, и освещенности помещения 75–100 лк, обеспечивающих фотопический уровень световой адаптации. Исследо-

вания остроты зрения проводятся с помощью традиционных психофизических пороговых методов измерения. В таблицах использованы разные размеры знаков, которые человек может различать с разного расстояния.

Снеллен, Ландольт, Дондерс, Головин и др. использовали метод пошагового приближения. Он заключается в том, что хорошо освещенный тестовый объект располагают в длинном помещении на дальней стене, а наблюдатель находится возле противоположной стены. В исходном состоянии испытуемый не различает тесты из-за их малого размера; затем он начинает медленно приближаться к ним. Момент обнаружения тестов на экране и момент их распознавания фиксирует врач, измеряя удаленность испытуемого от экрана. Затем испытуемый удаляется от объектов, а врач фиксирует момент, когда изображения перестают распознаваться. Несмотря на недостатки, связанные с трудоемкостью подобного измерения порогов, угловая точность метода велика.

Таким образом, мы рассматриваем результаты исследований разрешающей способности классическими методами с использованием либо подручных средств XIX столетия, либо аналогичных измерений, но с помощью компьютера и дисплея, управляемых программой. Независимо от техники измерения остроты зрения, при эмметропической рефракции и при размере зрачка в 2–3 мм фактором, обычно лимитирующим разрешающую способность, называют размер рецепторов. При этом зачастую подразумевается, что для обнаружения разрыва величиной в 1 угл. мин. при проекции изображения на сетчатку разрыв должен попасть на одну колбочку, а края изображения — на соседние с ней колбочки. При этих допущениях размер колбочки должен быть близким к 1 угл. мин. Именно этот размер и приводят во многих учебниках как лимитирующий остроту зрения фактор. Представляется, что этот фактор действительно решающий, однако это не так. Проведенные за сто лет измерения позволяют утверждать, что диаметр фоторецепторов в самой центральной части сетчатки в фовеа, а точнее в ее центре — в фовеоле, составляет в среднем 0,4 ± 0,2 угл. мин., то есть у отдельных людей диаметр колбочки в фовеоле может составлять всего 0,2 угл. мин. и менее.

Фовеола — область максимально высокой остроты зрения, с удалением от нее острота зрения падает (см. гл. 6). Колбочки в фовеоле плотно упакованы. С удалением от фовеолы размеры рецепторов растут, увеличивается пространство между ними, заполненное палочками, разрешающая способность падает [Curcio, Sloan, Kalina et al., 1990; Perry, Cowey, 1985; Polyak, 1941; Williams, 1988; Williams, Brainard, McMahon et al., 1994].

На основании того, что угловые размеры колбочек в фовеоле значительно меньше разрешающей способности, был сделан вывод, что ограничения вносят и другие факторы. Из оптических факторов при эмме-

тропической рефракции в первую очередь к ним относятся аберрация и дифракция. Известно, что ширина оптической функции рассеяния «точки» в глазу человека на уровне половины своей амплитуды приблизительно равна 1 угл. мин. [Campbell, Gubisch, 1966]. Данные о величинах функции рассеяния и диаметров фоторецепторов в фовеоле позволили Ф. В. Кемпбеллу и Ю. Е. Шелепину рассчитать область, засвечиваемую светящейся точкой на сетчатке. Наблюдаемая «бесконечно» малая светящаяся точка (например, звезда) активирует одновременно группу из семи рецепторов; один из них расположен в центре, а шесть — в вершинах правильного шестиугольника [Кемпбелл, Шелепин, 1990; Campbell, Shelepin, 1989]. Таким образом, диаметр эффективной части функции рассеяния, равный 1 угл. мин., перекрывает 2–3 колбочки, если диаметр каждой из них равен 0,4 угл. мин., что соответствует средним значениям. Это означает, что на уровне рецепторов в силу оптических законов формируется «функциональный» элемент дискретизации. Такими (более крупными, чем рецепторы) элементами, сопоставимыми с размером функции рассеяния точки при оптимальных условиях освещенности сетчатки, и производятся описание изображений и дальнейшая передача информации на более высокие уровни зрительной системы. При этом изображение можно представить как двумерный массив со значениями, равными усредненной яркости по группе из семи рецепторов. Отметим, что «функциональный» элемент дискретизации не исключает роль фоторецепторов как основных анатомических элементов дискретизации, необходимых для передачи оптического изображения, сформированного на сетчатке, в нейронные сети зрительной системы. Функциональные пространственные элементы не являются жестко связанными между собой группами рецепторов, это мобильные их объединения, формирующие сигнал на последующие уровни зрительной системы под воздействием самого изображения.

Матрица шестигранников имитирует упорядоченную матрицу фоторецепторов. На них спроецированы изображения пар «светящихся бесконечно малых точек», размытых оптикой глаза. Оптическая функция рассеяния показана под изображением каждой точки. Цифровой синтез данного изображения осуществлен В. Б. Макуловым и В. Н. Пауком в Государственном оптическом институте имени С. И. Вавилова [Кемпбелл, Шелепин, 1990; Шелепин и др., 1995; Шелепин, Бондарко, 2002].

Для измерения и описания свойств разрешающей способности глаза удобно использовать две точки. Данные измерения продолжили исследования, накапливаемые еще с XVII столетия. В соответствии с полученными данными человек отличает две точки от одной при их разнесении приблизительно на 1 угл. мин. Однако в пороговых условиях испытуемый не сразу видит две точки четко и раздельно. На пороге различения

в 1 угл. мин. в условиях принудительного выбора человек может догадываться, одна это точка или две (равные по яркости одной), лишь потому, что видит при наблюдении двух точек вытянутый штрих. Изображения двух точек на пределе разрешения зрительной системы при расстоянии между точками, меньшем 1 угл. мин., воспринимаются как одна точка, а при расстоянии, превышающем 1 угл. мин., как короткий штрих. При расстоянии в 1,5 угл. мин. возникает неустойчивость восприятия — появляется кажущееся мерцание центра штриха, а при удалении в 1,7 угл. мин. появляется кажущееся мерцание краев штриха; и только при расстоянии более 2,3 угл. мин. между центрами пятен отчетливо виден промежуток, что дает уверенное различение точек как раздельных единиц. Мы привели средние данные, но есть отдельные испытуемые с разрешающей способностью, превышающей среднюю в два раза. Таким образом, при расстояниях между центрами точек, равными 1 угл. мин., наблюдатель по форме стимула (наличию штриха), а не по четкому различению двух точек, догадывается, что предъявляется не одна точка, а две. При расстоянии более 2 угл. мин. он отчетливо видит их раздельно.

Эффект восприятия изображения двух точек четко раздельно возникает тогда, когда достигаются условия, соответствующие критерию Рэлея. В 1878 году Рэлей показал, что изображения двух точек одинаковой яркости можно видеть раздельно, если центр дифракционного пятна (функция рассеяния точки) каждой из них пересекается с краем первого темного кольца другой [Rayleigh, 1879–1912]. Критерий Рэлея был принят в качестве простого и понятного критерия определения разрешающей способности исследуемой системы.

На рис. 2.2 схематично в виде шестигранных ячеек представлена упорядоченная матрица фоторецепторов. В живом глазу их форма и «упаковка» подобны этой схеме, за исключением некоторых малых колебаний в размерах одного рецептора по отношению к другому. На изображения этих идеализированных «рецепторов» спроецированы изображения пар светящихся, исходно «бесконечно» малых точек. Если размер одной ячейки примем равным 0,4 угл. мин. (что соответствует усредненным анатомическим данным), а ширину функции рассеяния точки на половине ее высоты — 1 угл. мин. приблизительно в соответствии с критерием Рэлея (функция представлена над изображением каждой точки), то получим изображения светящихся пятен, спроецированных на идеализированную сетчатку. Видно, что бесконечно малая точка на сетчатке занимает вполне конкретную область — и эта область превышает размеры отдельных рецепторов. Функциональным элементом дискретизации изображений на сетчатке является не отдельно взятый фоторецептор, а их гексагональное объединение, согласованное с оптикой глаза. Анатомический элемент дискретизации — рецептор.

Оптическая функция рассеяния и мозаика фоторецепторов в фовеальной части сетчатки согласованы. Шаг, с которым изменяются ощущения восприятия двух точек (1,1; 1,4; 1,7; 2,3 угл. мин.), сопоставим с гексагональной упаковкой рецепторов. Приведенные цифры — результат измерений у одного наблюдателя, но абсолютные значения у разных наблюдателей меняются, шаг приблизительно остается неизменным.

Представленные на рис 2.2 экспериментальные данные, полученные вначале на одном человеке с нормальной остротой зрения, полностью соответствуют условиям разрешающей способности системы, определяемой дифракцией, и соответствующих критерию Рэлея. Мы установили, что пер-

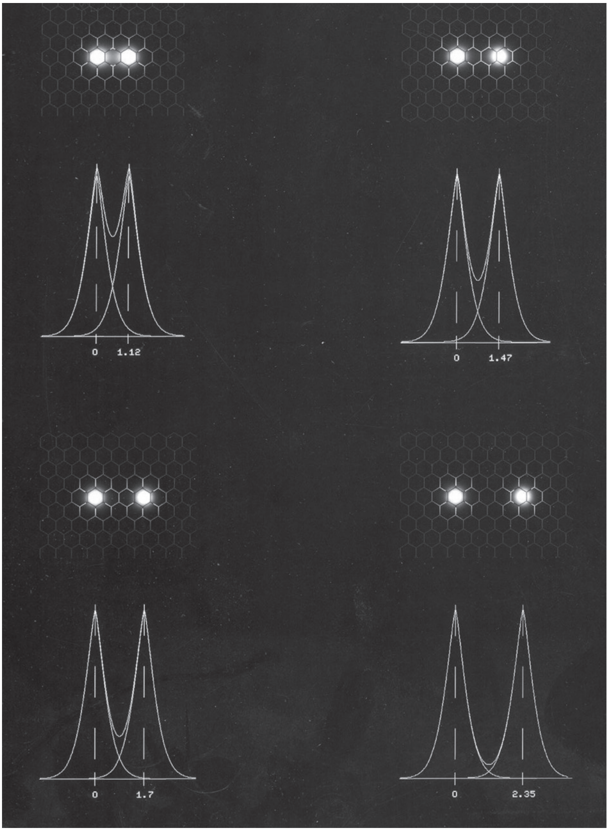


Рис. 2.2. Согласованность двухточечного теста с функцией рассеяния этих точек оптикой глаз и с мозаикой фоторецепторов сетчатки [Кемпбелл, Шелепин, 1990; Campbell, Shelepin, 1989; 1992]

вая цифра — 1,1 угл. мин. — соответствует тому, что изображение двух точек выходит за пределы эффективной части функции рассеяния, гексагональной матрицы рецепторов из трех элементов в диаметре (рис. 2.2), следовательно, при наблюдении двух точек, разнесенных на 1 угл. мин., наблюдатель с разрешающей способностью глаза в 1 угл. мин. действительно может определить наличие «штриха», а не одной точки. Еще раз укажем, что это средние данные.

На рисунке наглядно представлены функциональные элементы, соответствующие семи колбочкам [Кемпбелл, Шелепин, 1990]. Интересно отметить, что около ста лет назад необходимость введения функционального элемента, равного группе из семи колбочек, упакованных в гексагон, уже была осознана, однако потом забыта. Роль объединяющего фактора в некоторых работах была приписана большим клеткам пигментного эпителия, также имеющим гексагональную упаковку и объединяющимся в группу из семи рецепторов [Цикуленко, 1926, 1927, 1929].

Таким образом, предельное минимальное разрешение (когда человек видит не точку, а штрих) соответствует расстоянию, равному трем колбочкам — два рецептора по краям соответствуют центру точек и одна — промежуточная. Но для четкого раздельного наблюдения двух точек таких условий недостаточно — в промежутке необходимо расположить три колбочки. Почему природа создала такое удивительное соотношение, когда размер колбочки в три раза меньше минимального разрешения оптики глаза? Согласно теореме В. А. Котельникова, сигнал со спектром, занимающим ограниченную полосу частот, может быть передан без искажений по каналу связи и для реализации этого положения необходимо, чтобы частота отсчетов превышала ширину полосы частот, занимаемых спектром передаваемого сигнала, более чем в два раза [Котельников, 1933]. Если это условие не выполняется, то составляющие сигнала с частотами, большими половины частоты отсчетов, создают помеху. Это справедливо как для электрических, так и для оптических сигналов [Красильников, 1986]. Данную помеху называют шумом дискретизации. Шум пространственной дискретизации является мультипликативным. Среднеквадратическое значение этой помехи прямо пропорционально значению сигнала. Из этого следует, что отношение сигнала к среднеквадратическому значению шума пространственной дискретизации не зависит от яркости передаваемого объекта [Красильников, 1986]. В зрительной системе эти отсчеты, то есть измерения яркости, осуществляют фоторецепторы. Отдельные фоторецепторы образуют мозаику, которая осуществляет дискретизацию изображения. Мозаика рецепторов и является источником шума дискретизации.

Итак, существует функциональный элемент дискретизации изображений в зрительной системе. Им является не отдельно взятый рецептор, а их

совокупность, состоящая как минимум из семи рецепторов: центральный фоторецептор и его гексагональное окружение (функциональный пиксель). Рецептор остается минимальным анатомическим элементом дискретизации (анатомическим пикселем). Под одной функцией рассеяния происходит суммация сигнала рецепторами. Далее в рецептивных полях ганглиозных клеток происходит суммация слабого сигнала от нескольких рецепторов, чтобы выделить его из шума. Функциональный пиксель — функциональный элемент дискретизации — может быть и большим, и очень большим в соответствии с тем, что в одном и том же месте сетчатки имеются рецептивные поля разного размера. В терминах пространственных частот системы этих разных функциональных элементов представляют собой входы каналов разной пространственной частоты [Campbell, Robson, 1968].

Для того чтобы уменьшить влияние шума пространственной дискретизации фоторецепторами, можно осуществить предварительную низкочастотную фильтрацию изображения, дефокусировку [Красильников, 1986]. Этот прием предварительной фильтрации до последующей дискретизации изображения (фоторецепторами) хорошо известен в технике [Красильников, 1986]. В нашем случае апертурой является зрачок глаза, поэтому изображение на сетчатке слегка расфокусировано в соответствии с функцией рассеяния. Как можно представить себе необходимость такой расфокусировки? Современные представления о шуме дискретизации хорошо соответствуют классическим наблюдениям и качественным моделям основоположников офтальмологии. Так, Гельмгольц обнаружил следующий эффект: если смотреть на мелкую решетку, образованную черно-белыми полосами, то на пределе разрешения полосы в этой решетке кажутся извитыми и даже разорванными. Гельмгольц, а затем и Дьюк-Элдер в своем известном руководстве по офтальмологии промоделировали это явление, закрасив активированные и неактивированные колбочки в гексагональной мозаике, изображенные на листе бумаги [Duke-Elder, 1962].

С. В. Чурашов с соавторами в Военно-медицинской академии в России и Д. Р. Вильямс с соавторами в Центре исследования зрения в Рочестере в США исследовали это явление детально с помощью лазерного интерферометра [Чурашов и др., 1990; Williams, 1988; Williams, Brainard, McMahon, 1994] и показали появление кажущегося муарового рисунка. Наблюдателю в этих исследованиях предъявляли решетку, сформированную непосредственно в фовеа в слое на поверхности фоторецепторов. Лазерный интерферометр формировал изображение, частично минуя искажения, вносимые оптикой глаза. Наличие биений между мозаикой рецепторов и тестовой решеткой было видно отчетливо, что и следует ожидать в соответствии с теоремой В. А. Котельникова [Котельников, 1934].

Функциональный элемент дискретизации согласован с организацией рецептивных полей нейронов более высоких уровней зрительной системы. Это установлено по определению порогов различения ориентации двух точек. Так как наблюдатель начинает видеть штрих в том случае, когда расстояние между двумя точками превышает 1 угл. мин., то он может оценить и ориентацию этого кажущегося штриха.

Таков вывод этих элементарных наблюдений, которые легко повторить каждому. Заметим, что все обсуждаемые в этом параграфе исследования с точками справедливы для определенных условий измерений, а именно: освещение черного, матового листа картона с белыми матовыми дисками на нем; использование дисков диаметром 2,5 мм из белой бумаги на площадке из черной бумаги 10 × 10 см без бликов; яркость черных участков экрана, равная 5 кд/м кв., яркость белых точек экрана — 1500 кд/м кв. При соблюдении данных условий, если функции рассеяния двух точек полностью перекрыты, то их можно видеть как одну точку, если же они выходят за определенные границы, то первое, что видит наблюдатель, — это штрих — короткую линию, образованную из двух точек. Так, большинство эмметропов видят Мицар и Алькор как единое целое — «всадник и лошадь». Первичное восприятие того, что мы видим не одну точку, — это восприятие штриха, после того как точки расходятся на пороговую величину. Наблюдатель сразу может оценить ориентацию этой линии (штриха). Наблюдатель, зная о том, что штрих может быть образован из точек, способен принять решение, что он видит две точки; если у него этих знаний нет, то может заключить, что видит короткую линию — штрих. Если две точки находятся на расстоянии 2 угл. мин., он видит их четко отдельно. Период — 30 цикл/угл. град.

Зрительная система легко оценивает ориентацию двух точек или короткой линии при размерах стимулов, превосходящих ширину эффективной части функции рассеяния. Измерить ориентацию изображений зрительная система может с помощью вытянутых рецептивных полей нейронов, находящихся на уровне не ниже стриарной коры. В рецептивных полях нейронов первичной зрительной коры происходит суммация слабого сигнала от расположенных в линию нескольких рецепторов с тем, чтобы выделить его из шума, но в отличие от рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки на этом уровне суммация происходит в одной ориентации. Цель суммации — оптимизация отношения сигнал/шум. Эффективная часть функции рассеяния точки больше отдельного фоторецептора — анатомического элемента дискретизации изображений. Подобная конструкция способствует уменьшению шума дискретизации (оптимизации отношения сигнал/шум). Под одной функцией рассеяния оказываются колбочки, настроенные на разные длины волн, что важно для пра-

вильного описания цвета изображений в нейронных сетях. С размерами эффективной части функции рассеяния согласованы размеры рецептивных полей нейронов ганглиозных клеток сетчатки. В рецептивных полях осуществляется оптимизация отношения сигнал/шум. Размеры элементов дискретизации изображений определяют размер пространственных элементов самых высокочастотных пространственно-частотных каналов. Они согласованы между собой.

Проблему остроты зрения мы рассмотрели в основном на примере описания точек в зрительной системе. Естественные светящиеся точки — звезды, с них началось изучение остроты зрения. Звезды (не планеты) можно рассматривать как бесконечно малые точки, их кажущаяся «величина» определяется исключительной яркостью. Для описания и понимания механизмов остроты зрения они являются исторически первыми, теоретически оптимальными стимулами.

Обнаружение и локализация светящейся точки в поле зрения лимитируется только ее яркостью и воспринимаемым контрастом, который определяется величиной внешнего (помехи) и внутреннего шума. Закон ее обнаружения описывается основным психофизическим законом Вебера—Фехнера. Из изображения звезд невозможно извлечь информацию об их размере. Звезды, классифицированные по величине, действительно были описаны еще Гиппархом исключительно на основании оценки их яркости. Следовательно, по яркости и по контрасту можно видеть объекты бесконечно малой величины. Это не проблема остроты зрения и не проблема разрешающей способности — это проблема чувствительности системы и отношения сигнал/шум по воспринимаемой яркости. Если контраст или яркость наблюдаемого объекта достаточны, то на сетчатке в силу функции рассеяния точки эта бесконечно малая величина принимает конечные размеры, даже превосходящие несколько колбочек. Помимо звезд к таким кажущимся парадоксам следует отнести возможность видеть тонкий провод на фоне неба. Его различение определяется исключительно контрастом, а изображение на сетчатке описывается функцией рассеяния линии. Не только в длину, но и в поперечнике она захватывает много клеток рецепторов, и поэтому может быть не только обнаружена, но и определена ее ориентация. Даже при обнаружении не «бесконечно» малых точек, а дисков конечных размеров задействуется свойство пространственной суммации.

Определение разрешающей способности для двух точек — сложная статистическая задача. Указанные нами величины могут колебаться. Значения порогов определяются на основе выбранного наблюдателем критерия. Критерий Рэлея справедлив для случая, когда стоит задача четкого различения двух точек отдельно. Однако наблюдателем может быть выбран другой

критерий. Человек отличает одну точку от двух по различению вытянутого штриха в случае двух точек и размытого диска для одной точки. Между ними есть промежуточные стадии, каждая из которых имеет свой порог. Размеры колбочек могут быть меньше указанных нами, поэтому и острота зрения может быть выше средней статистической примерно в два раза.

Более сложная задача по сравнению с оценкой ориентации — распознавание формы объектов. На рис. 2.3 приведены измерения минимальных размеров черно-белых изображений натуральных объектов методом пределов (критерий — четкое ви́дение). Среди них присутствовали изображения человеческого лица, снежинки, ножниц, буквы «С», двухточечный тест и т. п. Для каждого изображения был определен тот минимальный размер, при котором оно оказалось четко видимым. Таким образом, была получена зависимость разрешающей способности от геометрии тестовых изображений. Эту зависимость мы назвали шкалой сложности. Рассмотрим шкалу сложности наблюдаемых изображений. Различение одной точки от двух точек происходит при размерах, несколько больших



Рис. 2.3. Шкала сложности объектов для распознавания (размерность шкалы — угл. мин.)

1 угл. мин. Различение простых геометрических фигур (треугольники, квадраты, круги) происходит при их угловых размерах, равных 3 угл. мин, букв — около 5 угл. мин. Стилизованные фигуры объектов повседневного обихода распознаются при 8–16 угл. мин., а лицо человека — при 21–30 угл. мин. Диапазон пороговых угловых размеров изображений от двухточечного теста до лица человека расположен в пределах от 2–3 до 20–30 угл. мин. Шкала четкого ви́дения при заданных условиях наблюдения соответствует «золотой пропорции».

Различение колец Ландольта происходит при угловых значениях всего кольца меньше 5 угл. мин., а разрыва — меньше 1 угл. мин. Этот тест человек различает по ориентации всего изображения (а не по ориентации самого разрыва), причем по ориентации размытого оптикой глаза несимметричного, уплощенного с одной стороны размытого пятна данного кольца с разрывом. По расположению уплощения в размытом изображении наблюдатель догадывается о местонахождении разрыва. Этот эффект известен давно [Холина, 1930]. Около ста лет назад были предприняты неоднократные попытки преодоления этой несимметричности, например за счет увеличения диаметра кольца в месте разрыва и уменьшения диаметра с противоположной стороны [Холина, 1930; Цикуленко, 1927]. Цифровая обработка изображений облегчает и уточняет эти представления [Ginsburg, 1971,1976; Bondarko, Danilova, 1997].

Исследования различения изображений разной сложности также осуществляются с помощью метода пределов, который используется еще с XIX столетия для определения порогов четкого ви́дения изображений. Используются черные фигуры на белом фоне без бликов. В наших исследованиях яркость черных участков экрана была равна 5 кд/м кв., белых точек экрана — 600 кд/м кв. Определяли те минимальные угловые размеры, при которых изображение было еще хорошо видно. Различия в пороговых угловых размерах рассматривались как критерий сложности изображений (рис. 2.3).

Для практических целей измерения остроты зрения давно были созданы различные тестовые знаки — оптотипы, а также стандарты ее определения. В 1862 году Херман Снеллен (H. Snellen) ввел количественную оценку остроты зрения в режиме различения. Он предложил буквенные символы определенных угловых размеров и принцип постоянного соотношения размера знака и толщины линии, из которого он построен (1 : 5). Снеллен в своей знаменитой работе «Test-Types», выдержавшей только с 1862 по 1863 год четыре издания, ввел определение остроты зрения в относительных единицах [Snellen, 1863]. Предложенные им относительные величины измерения остроты зрения оказали огромное влияние на стандартизацию измерений в офтальмологии.

Надо понимать, что перевод по формуле Снеллена относительных величин нормы остроты зрения (1,0) к величинам разрешающей способности (1 угл. мин.) зависит от свойств оптотипа. Острота (*V*) — это отношение расстояния, на котором испытуемый различает знаки (*d*), к расстоянию, при котором размер различаемой детали этого знака в этом случае составит одну угловую минуту (*D*). При изменении формы оптотипа изменятся предельные расстояния. Например, принятые в качестве стандарта кольца Ландольта в действительности дают другие значения, нежели буквенные оптотипы или решетчатые миры. Глубокий смысл формулы, предложенной Снелленом, в том, что в знаменателе он поставил угловые размеры знака и указал отношения размеров элементов знака к размеру знака, тем самым показал принцип разрешающей способности элемента формы знака (предельно разрешаемых деталей) и разрешающей способности знака как целого объекта.

Определение остроты зрения по формуле Снеллена стало относительно удобной мерой остроты зрения и основной количественной мерой сохранности зрительных функций на протяжении почти ста пятидесяти лет. Символы для проверки зрения, построенные на основе принципа Снеллена, получили в различных модификациях повсеместное распространение. Из отечественных вариантов таблиц этих оптотипов наибольшее распространение получили таблицы Головина, названные в дальнейшем таблицами Головина—Сивцева [Головин, 1925; Головин, Сивцев, 1926]. Современные таблицы Коскина, Бойко и др. сохраняют этот принцип [2002, 2005].

Ландольт предложил кольца с разрывом позднее Снеллена, но в силу ряда обстоятельств, и в первую очередь кажущейся простоты и легкости для интернационального использования, именно они были приняты в качестве эталонных оптотипов в офтальмологии. В соответствии с международными стандартами ISO 8596 с ними принято сравнивать все другие оптотипы [Word recommended standard, 1980]. Постоянно делались попытки их усовершенствования. Помимо буквенных оптотипов широкое распространение получили двухточечный тест, уже упомянутые нами кольца Ландольта и штриховые миры; были предложены шахматные паттерны, буквы Е в четырех разных ориентациях — всех не счесть. Острота зрения, измеренная каждым из этих тестов, имеет несколько различные величины, это связано с тем, что порог, как указывал еще Снеллен, зависит от формы стимула (см. рис. 2.4).

Упомянутые нами таблицы, тестовые знаки, буквенные оптотипы и кольца Ландольта успешно служат многие десятилетия и, вероятно, будут еще долго служить для грубой оценки остроты зрения в относительных единицах и решения такой важной задачи, как подбор корригирующих линз. Однако для тонкой дифференциальной диагностики поражений зрительного анализатора, динамического наблюдения эффективно-

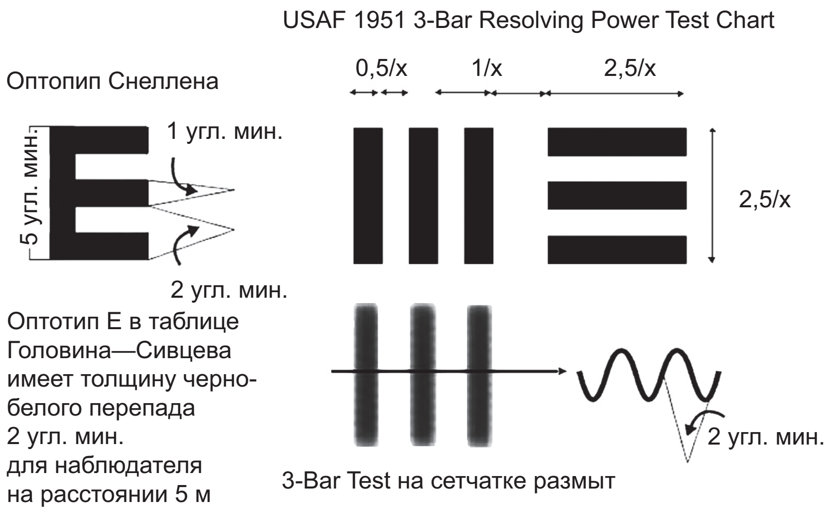


Рис. 2.4. Принцип построения знаков (оптотипов) для исследования остроты зрения и разрешающей способности

сти лечения, для решения многочисленных задач офтальмоэргономики оценка сохранности зрительных функций с помощью знаков в этих таблицах недостаточна. Известно, что не все буквы из общепринятых таблиц одинаково хорошо различимы, не всегда чем больше буква, тем лучше ее видно, буквы одного ряда не всегда одинаково различимы с одного и того же расстояния. Кроме того, обнаружение какого-нибудь знака и его узнавание происходят на различной удаленности от наблюдателя. Острота зрения, измеренная в поликлинических условиях, зачастую не соответствует остроте зрения на открытой местности или в условиях бокового ослепления. Для разных выборок испытуемых величина остроты зрения может несколько изменяться. Поэтому, несмотря на то что и Головин, и Холина установили среднюю величину остроты зрения эмметропического глаза, равную 1,1, за норму все же принимают именно единицу [Головин, 1923; Холина, 1930], хотя есть понимание того, что это условная величина и есть испытуемые, у которых острота зрения вдвое превышает среднее значение. Снижение остроты вдвое и приближение к единице воспринимаются этими испытуемыми как ухудшение зрения. Поэтому изменение остроты зрения у людей с остротой зрения выше единицы требует точного измерения, и для этих целей уже давно созданы специальные таблицы тестов, в которых подробно делаются измерения остроты зрения от 1,0 до 2,0 [Холина, 1930; Рожкова, Токарева, 2001; Коскин и др., 2002].

Особый интерес представляет точное измерение остроты зрения вблизи. Это необходимо не только для подбора очков на близкое расстояние, но и для решения целого ряда других задач, например динамики изменений остроты зрения у лежачих больных [Головин, 1923; Коскин и др., 2002].

Для определения разрешающей способности оптических систем в качестве стандарта принята трехшпальная мира ВВС США 1951 года [USAF, 1951] (рис. 2.5).

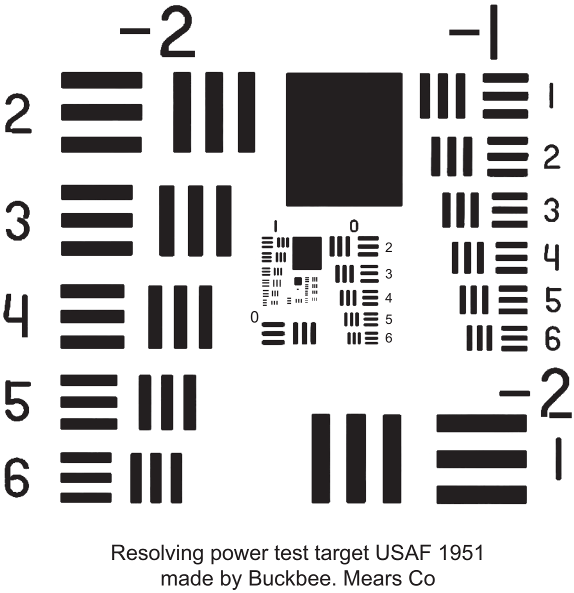
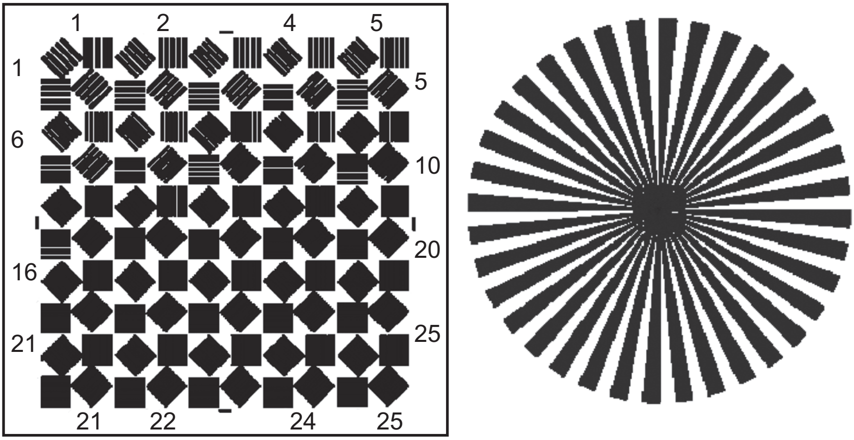


Рис. 2.5. Трехшпальная мира ВВС США 1951 года. Военный стандарт США для оптических измерений разрешающей способности оптических устройств; широко применяется в офтальмологии для измерения разрешающей способности и остроты зрения

В Союзе ССР в качестве стандарта в те же годы была принята мира ГОИ (Государственного оптического института имени С. И. Вавилова) (рис. 2.6).

Все эти миры имеют достоинства и недостатки, используются для измерения оптических систем и фоточувствительных материалов, фотопластин, фотопленок, дискретных матриц и т. д. [Зворыкин, 1933]. Некоторые исследователи рекомендуют их даже для клинических измерений. Но для определения разрешающей способности глаза и остроты зрения в клинической офтальмологии приняты свои стандарты — Методические указа-



а *б*

Рис. 2.6. Штриховая мира ГОИ (*а*); радиальная мира ГОИ (*б*)

ния единообразия при исследовании остроты зрения (М.: МЗ СССР, 1963) и Word recommended standard procedures for the clinical measurement and specification of visual acuity 1980.

Каковы перспективы развития методов для измерения остроты зрения и повышения точности? Во-первых, более точное количественное описание оптотипов методами цифровой обработки изображений. В частности, методы спектральной обработки, а именно — пространственно-частотный подход [Волков, Шелепин, Макулов и др., 1987; Коскин, Бойко, Соболев и др., 2005; Коскин и др., 2002; Шелепин и др., 1987; Шелепин и др., 1992]. Спектральные характеристики оптотипов должны быть согласованы с пространственно-частотными характеристиками зрения (см. гл. 3). Еще раз напомним, что исходным для традиционной оценки остроты зрения является размер тестового знака. Однако пространственно-частотный спектр даже узкой полосы достаточно широк — он захватывает область как низких, так и высоких пространственных частот. Чувствительность зрительной системы максимальна в области средних пространственных частот. Именно поэтому можно обнаружить наличие узкой полосы или точки, даже если угловые размеры меньше расчетной остроты зрения.

Увеличение ширины тестового стимула сдвигает спектр изображения в область низких пространственных частот. Если рассмотреть спектр не единичной полосы, а буквенных оптотипов, то можно даже заметить, что малые тестовые знаки занимают довольно широкую полосу частот. Увели-

чение размеров буквы лишь несколько смещает распределение гармонических составляющих в область низких пространственных частот.

Так как реальные изображения расположены на двумерной поверхности, то для их описания необходимо рассматривать двумерный пространственно-частотный спектр. Чем сложнее изображение, тем сложнее его двумерный пространственно-частотный спектр. Для описания общего вида простых тестовых изображений (например, колец Ландольта) достаточно использовать лишь первые гармоники — низкочастотные составляющие спектрального описания изображений [Ginsburg, 1971, 1976; Bondarko, Danilova, 1997; Бондарко и др., 1999].

В то же время высокая острота зрения не всегда является показателем качественного восприятия. Не только объяснить, но и упомянуть все имеющиеся парадоксы, возникающие при измерении остроты зрения, не удается в рамках традиционных подходов. Эффективным оказалось применение пространственно-частотных представлений для исследования зрительной системы и для понимания ее организации. Пространственно-частотный подход дает возможность описать на одном языке как само изображение, так и передаточные характеристики различных звеньев зрительной системы [Шелепин и др., 1985].

Развитие методов цифровой и оптической обработки изображений в дальнейшем значительно расширило возможности данного подхода [Шелепин и др., 1998]. Более того, развитие иконики позволило создать новый класс оптотипов, лишенный ряда недостатков. Это так называемые исчезающие оптотипы [Коскин, Бойко и др., 2005]. Лучшими из исчезающих оптотипов являются решетки Габора. Для данного сигнала легко определить (или задать при синтезе) пространственно-частотные характеристики, их легко балансировать относительно уровня серого. Именно этот тип сигнала явился основным в современных исследованиях механизмов зрения.

Взаимосвязь физических характеристик тестовых изображений с характеристиками оптических и нейронных механизмов зрительной системы приведена на примере восприятия двухточечного теста, на основании которого осуществляется выбор критерия испытуемым, и он принимает решение о тесте, а врач судит об остроте зрения пациента. На выбор критерия испытуемым влияют инструкция, знание набора оптотипов, внимание испытуемого, форма и сложность, контраст, яркость оптотипа и фона, уровень внутреннего шума в зрительной системе. От инструкции, характеристик стимула и выбора критерия испытуемым пороги меняются очень сильно. Интересно, что исторически это привело даже к введению специальных терминов для каждого варианта комбинаций инструкции, стимула и критерия: minimum cognoscible, minimum separable и т. д. Особый интерес представляют условия, при которых возникает так называемая гиперострота зрения.

2.2. ГИПЕРОСТРОТА ЗРЕНИЯ

Принято считать, что существуют стимулы и условия, при соблюдении которых возможно преодоление ограничений остроты зрения, определяемых оптикой и анатомией сетчатки. Эти условия и стимулы известны давно. Еще в 1631 году директор Монетного двора во Франш-Конте (Бургундия) П. Верньер предложил устройство из двух шкал, в основу которого заложен принцип коллинеарности двух штрихов в этих шкалах. Психофизический прием измерения точности коллинеарности оказался чрезвычайно важен, без него невозможно было бы возникновение машиностроения — он использован во всех микрометрах, логарифмических линейках и т. д. (Верньерная острота зрения подразумевает смещение лишь одного штриха на верхней шкале относительно другого только одного колинеарного штриха на нижней шкале, а не принцип работы нониунса как системы двух шкал.)

Определение порогов измерения коллинеарности полезно для понимания многих механизмов зрительной системы. Ознакомиться с верньерным устройством можно, изучив методику измерения размеров с помощью штангенциркуля. В данном контексте отметим, что отклонение от коллинеарности двух штрихов в обеих шкалах наблюдатель видит при значениях значительно меньших, чем это допускает разрешающая способность глаза (1 угл. мин.). Величина смещения линий друг относительно друга может составлять всего несколько угловых секунд. Поскольку данные величины значительно ниже разрешающей способности глаза, верньерный эффект был отнесен к явлениям гиперостроты зрения. Введение этого термина было связано с предположением, что у верньерных стимулов информативной является величина смещения одной линии относительно другой. Такой точке зрения способствовало само верньерное устройство.

Рассмотрим другой подход, более верный с точки зрения оптики изображения на сетчатке. На пороге разрешения верньерных стимулов зрительная система не осуществляет оценку смещения одной линии относительно другой. Установлено, что пороги разрешения определяет не сдвиг верньерных линий, а наклон участка изображения возле конца соприкасающихся коллинеарных или смещенных линий верньерных стимулов. Необходимо обратить внимание, что наблюдатель почти с такой же точностью, как взаимное смещение линий, оценивает взаимное смещение двух точек. Единственное добавочное условие состоит в том, что точки должны быть разнесены на достаточное расстояние друг от друга, то есть чтобы условия не противоречили разрешающей способности двух точек. Этот наклон продемонстрирован методами цифровой обработки изображений (иконики) на примере двухточечного теста (рис. 2.7).

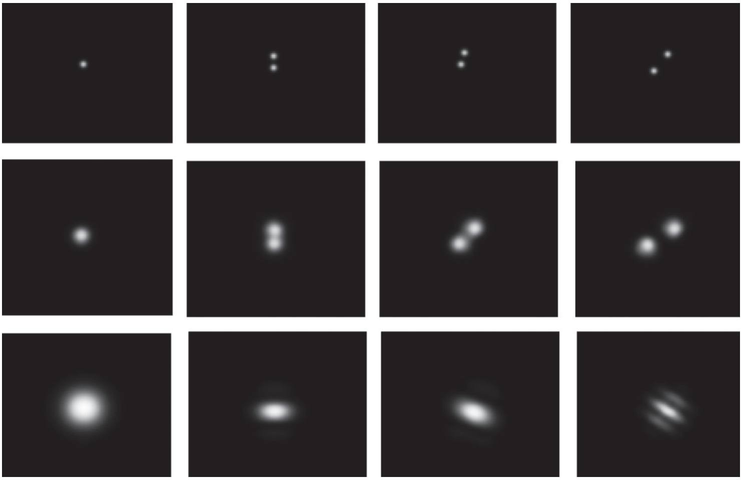


Рис. 2.7. Точечный верньерный стимул и его описание оптической системой глаза с помощью двумерного пространственно-частотного спектра. Верхний ряд — четыре изображения тестовых точек («звезды»); средний ряд — размытые оптикой глаза изображения этих тестовых точек на глазном дне; нижний ряд — двумерный пространственно-частотный спектр четырех изображений точек на сетчатке. В центре каждого из четырех нижних изображений — нулевая пространственная частота спектра. От нулевой к краям каждого из нижних рисунков идет нарастание пространственной частоты — это двумерный пространственно-частотный спектр. Виден наклон спектра, он связан с наклоном распределения яркости в самом изображении

Представим эти изображения на пределе разрешения. Необходимо учитывать размытия изображения этих точек линий оптикой глаза. Обычно в исследованиях верньерной остроты зрения предъявляют высококонтрастные двуградационные (черно-белые) стимулы, однако изображения стимулов, наблюдаемых на пределе разрешения, на сетчатке глаза всегда размыты. Характер этого размытия описывается функцией рассеяния оптики глаза. Чтобы построить изображение такого вида, какое оно имеет на сетчатке, необходимо провести операцию свертки исходного изображения с функцией рассеяния точки оптикой глаза (рис. 2.7).

Для правильной цифровой обработки верньерных изображений необходимо определить соотношение размеров окна обработки изображения (окна дискретизации) и элемента дискретизации. Этот выбор позволяет учесть размеры верньерных стимулов и площадь фона. Ширина функции рассеяния, взятая на половине ее высоты и равная 1 угл. мин., была выбрана функциональным элементом разбиения и явилась отправной точкой синтеза и обработки верньерных изображений. Число элементов дискретизации размытого изображения, взятое на половине высоты функции

рассеяния, позволяет соотнести результаты физиологических измерений, выраженные в угловых минутах, с числом элементов дискретизации (пикселей) размытого изображения в ЭВМ, приходящихся на ширину функции рассеяния [Шелепин, Чихман, 1998].

Предельно малая длина для верньерных стимулов — это две точки, разнесенные на то расстояние друг от друга, когда они перестают сливаться в одну. Это, как было рассмотрено ранее, происходит в соответствии с критерием Рэлея, когда первый максимум функции рассеяния одной точки совпадает с первым минимумом функции рассеяния второй точки. Функции рассеяния двух точек в этих условиях пересекаются на половине своей высоты. Число пикселей полученного размытого изображения в выбранном окне дискретизации компьютера можно соотносить с известными, согласно критерию Рэлея, угловыми размерами реальных тестовых объектов. Поэтому шкалы, где единица измерения построена на его основе, сопоставимы. В результате шкалы изображений для ЭВМ благодаря общей единице измерений можно сопоставлять с результатами психофизических измерений [Шелепин, Чихман, 1998].

Результат цифровой обработки изображений двумерного амплитудного пространственно-частотного спектра представляет собой матрицу, в центре которой расположена нулевая гармоника. По мере удаления от центра элементы матрицы представляют более высокие гармоники спектра. Ориентация элементов исходного изображения описывается ориентацией гармонических составляющих относительно X-, Y-координат в изображении двумерного амплитудного пространственно-частотного спектра. Значения амплитуд на дисплее кодируются яркостью элемента матрицы — пикселя, а на бумаге — плотностью расположения точек или размером точек полиграфического растра в соответствующем месте представления матрицы. В изображениях спектра оценивали положение гармонических составляющих относительно X-, Y-координат.

В верхней строке рис. 2.7 представлены исходные изображения точек. В первой клетке одна точка, а в остальных — пары верньерных точек, имитирующих верньерные стимулы с разным сдвигом. В средней строке представлены наблюдаемые испытуемым истинные размытые изображения верньерных стимулов оптикой глаза на сетчатке на пределе разрешения. Видно, что в результате размытия бесконечно малые точки превратились в нечеткие пятна в соответствии с функцией размытия точки. Нижняя строка — пространственно-частотные спектры размытых изображений, представленных в средней строке. Главное — наклон основных гармонических составляющих в спектре, который и определяют ориентационно-избирательные нейроны зрительной коры, обеспечивающие пространственно-частотную фильтрацию в двумерной плоскости.

В средней части — результат проведенной операции, имитирующей размытие исходных изображений оптикой глаза. В нижней части рисунка представлены результаты описания размытых изображений (средняя строка) с помощью двумерного преобразования Фурье. В нижней строке изображен амплитудный спектр. В центре пятна спектра представлена нулевая гармоника. X- и Y-координаты делят квадрат по центру (но на рисунке они не изображены). Яркость пикселя на рис. 2.7 показывает амплитуду той или иной гармоники в спектре. Нулевая частота находится в центре светлых пятен — пространственно-частотных спектров каждого изображения; чем дальше от центра, тем выше пространственная частота.

Вверху первого столбца рисунка представлено изображение одной точки. Видно, что размытое изображение одной точки представляет собой круглое пятно, а спектр равномерен во всех ориентациях, основная энергия сосредоточена в области низких пространственных частот, ближе к центру изображения спектра, так как это спектр не бесконечно малой точки (спектр которой широк), а реального размытого изображения точки на сетчатке.

Во втором столбце представлено изображение двух точек. Размытое изображение двух точек, расположенных строго по вертикали друг над другом и удаленных на расстояние, соответствующее 1 угл. мин., представляет собой не две отдельные точки, а вытянутое пятно — размытую линию, что соответствует критерию Рэлея. В третьем столбце рисунка вверху — изображение двух точек, удаленных на расстояние, соответствующее 1 угл. мин., но смещенных по горизонтали (на величину порядка двадцати секунд). Размытое изображение этих точек представляет собой также размытую линию, но с наклоном. Спектр похож на предыдущий, но имеет выраженную наклонную составляющую.

В пространственно-частотном описании важно, где сосредоточена основная энергия (за исключением постоянной составляющей) амплитудного спектра изображения. Эта часть спектра в данной задаче выполняет роль информативного признака, который использует зрительная система. Цифровая обработка верньерных стимулов позволила подтвердить, что информативным в изображении верньерных стимулов является ориентация размытого изображения на сетчатке, которая описана с помощью двумерного преобразования Фурье.

Помимо точек ориентационный эффект справедлив и для собственно верньерных линий. Наблюдение вблизи (то есть наблюдение больших коллинеарных линий) затрудняет возможность увидеть наклонную составляющую в верньерных стимулах, сдвинутых по вертикали относительно друг друга на 20 угл. сек. Положение этих линий (как и смещенных точек) экспериментаторы обычно интерпретируют как верньерный сдвиг одной линии относительно другой. Этот сдвиг меньше того, что может обеспечить

разрешающая способность глаза. Как правило, построение верньерных стимулов осуществляется экспериментатором вблизи, то есть не на пределе разрешения. В этих условиях он не видит изображение размытым и признак сдвига для него превалирует, а о признаке ориентации надо догадываться. В амплитудном пространственно-частотном спектре одной линии основная энергия сосредоточена в области низких пространственных частот. Для двух коллинеарных линий (одна является продолжением другой, но с разрывом между ними на величину, соответствующую 1 угл. мин., и они не имеют сдвига на верньерный манер) двумерный Фурье-спектр напоминает спектр одной линии, но более широкий. Если коллинеарность линий нарушена (они сдвинуты на верньерный манер одна относительно другой), Фурье-спектр совершенно иной, в нем появляется выраженный наклонный ориентационный низкочастотный компонент. Следует еще раз отметить, что в неразмытом изображении этих линий наклонный компонент не очевиден. Цифровая обработка изображений обеспечивает размытие, то есть имитирует наблюдение на пределе разрешения, именно то, что и присутствует на сетчатке глаза в этих условиях наблюдения. Затем проводим Фурье-анализ размытого изображения в окне в пределах 10 угл. мин. Область анализа выбрана на основании экспериментальных данных. Известно, что в пределах 10 угл. мин. увеличение длины линий понижает пороги распознавания верьерных стимулов. Дальнейшее увеличение длины перестает оказывать влияние на пороги распознавания верньерного стимула. Фурье-анализ в пределах этого окна наиболее четко демонстрирует ориентационную составляющую. Превышение угла анализа снижает наглядность ориентационной составляющей. Повышение длины линий от самых коротких, равных точкам до 10 угл. мин., приводит к повышению выраженности ориентационной составляющей.

В четвертом столбце вверху (рис. 2.7) представлено изображение двух точек, удаленных на расстояние, соответствующее 2 угл. мин. Результат размытия такого изображения позволяет видеть две отдельные точки. На этом рисунке уже не так явно наблюдается наклонная составляющая. Для того чтобы увидеть наклон, надо мысленно соединить точки линией. Описание же изображения этих удаленных точек с помощью двумерного преобразования Фурье наглядно демонстрирует наличие наклонного компонента. Наклонный компонент ярко выражен в низкочастотной части спектра, то есть в части спектра, где сосредоточена основная энергия.

Выраженный наклонный ориентационный компонент в пространственно-частотном двумерном спектре верньерных изображений позволяет продемонстрировать то, что неявно для неискушенного наблюдателя, но присутствует в самом оптическом изображении. Благодаря цифровой обработке тестовых изображений выделяется важнейший признак — ориентаци-

онная составляющая тестового изображения. Величина наклона ее пропорциональна величине сдвига линий или точек друг относительно друга. Эту величину и измеряют рецептивные поля зрительной коры, чувствительные к ориентации гармонических составляющих пространственно-частотного спектра изображения. Информативным признаком является ориентация низкочастотной составляющей амплитудного пространственно-частотного спектра, поэтому в отличие от сдвига признак ориентации выделяется механизмами в пределах разрешающей способности глаза и обычной остротой зрения. Поэтому на наш взгляд, потребность в поиске невероятных механизмов гипероcтроты отпадает [Шелепин, Чихман, 1998].

Методами цифровой обработки изображений (иконики) и методом математического моделирования было продемонстрировано единообразие механизмов, определяющих остроту и гипероcтроту зрения. В обсуждении верньерной остроты зрения обычен акцент на нерешаемой проблеме измерения в зрительной системе сдвига между наблюдаемыми линиями, величина которого меньше размера колбочки, то есть меньше элемента разбиения. Мы перенесли формулировку задачи из нерешаемой проблемы в проблему решаемую. Указали на то, что происходит в этой ситуации не измерение сдвига, который задает экспериментатор, а обнаружение ориентации, то, что задает сама оптика изображения. Обнаружение ориентации пространственно-частотной составляющей в двумерном спектре является естественным процессом выделения сигнала, присутствующего в изображении. Это является физическим свойством оптического изображения. Низкочастотная ориентационная составляющая в двумерном амплитудном пространственно-частотном спектре изображения верньерных стимулов отражает объективные физические характеристики верньерных стимулов на сетчатке. Механизмы оценки ориентации в зрительной системе изучены хорошо после работ Хьюбела и Визела [Hubel, Wiesel, 1959; 1974]. Известна ориентационная разрешающая способность [Field, 1993]. В зрительной системе имеются нейроны, которые выделяют ориентационную и пространственно-частотную составляющую в изображении. Собственно, измерения ориентации обеспечивает система ориентационно-оппонентных нейронов [Шелепин, 1981 а; 1981 б].

2.3. ИСЧЕЗАЮЩИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В естественных и клинических условиях наблюдения приближающихся или удаляющихся объектов имеются два основных порога — порог обнаружения наличия объекта и порог распознавания формы фигуры этого объекта. Эти два порога характерны для большинства объектов в естественных

условиях наблюдения. Одна и та же фигура распознается и обнаруживается на различных расстояниях. Для изображений обычных контурных фигур дистанция обнаружения и дистанция распознавания значительно отличаются. В условиях, превышающих разрешающую способность, наблюдатель может только указать наличие и местоположение обычного изображения полностью размытого оптикой глаза. Первый порог (порог обнаружения) лимитируется яркостью фигуры и контрастом. Этот порог достигается при обнаружении размытого пятна изображения объекта. При дальнейшем приближении к объекту достигается второй порог — порог распознавания данного объекта, который лимитируется разрешением.

При превышении порога разрешающей способности наблюдатель может различить форму фигуры. Наличие двух порогов представляет большую проблему в задачах измерения остроты зрения, так как между дистанцией распознавания и дистанцией обнаружения имеется переходная зона и испытуемые научаются распознавать нечеткие, размытые изображения возле порога их обнаружения. На этом основывается большинство методов «улучшения» зрения при амблиопии, а вовсе не в действительном повышении остроты зрения в результате изнурительных тренировок детей, поддерживаемых упорством родителей и заинтересованностью тех, кто проводит тренировки. Положение одного и второго порогов зависит от целого ряда условий: контраста, яркости, цвета, наличия помехи, отношения сигнал/шум, концентрации внимания и состояния наблюдателя. Расчет величины порога определяется выбранным критерием — процентом правильных ответов. Различия в угловых порогах обнаружения и распознавания характерны для наблюдения практически всех реальных объектов, а также обычных шрифтов, в том числе оптотипов, применяемых для измерения остроты зрения. Наличие двух порогов является одной из причин вариабельности результатов измерений остроты зрения. Методы цифровой обработки изображений — иконики позволили предложить путь создания фигур нового типа, у которых бы совпадали дистанции обнаружения и распознавания, они получили название исчезающих. Это название связано с тем, что при уменьшении оптотипа или при удалении от него наблюдатель мгновенно перестает видеть форму оптотипа и не может определить положение данного объекта в поле зрения. При превышении пороговой дистанции распознавания наблюдатель видит вместо оптотипа его размытое пятно. В этом принципиальное отличие исчезающих фигур (рис. 2.8) от изображений всех остальных шрифтов и оптотипов.

Исчезающие оптотипы позволили свести известные различия в порогах обнаружения и распознавания к минимуму. Разными исследователями были созданы различные исчезающие оптотипы, удовлетворяющие этим

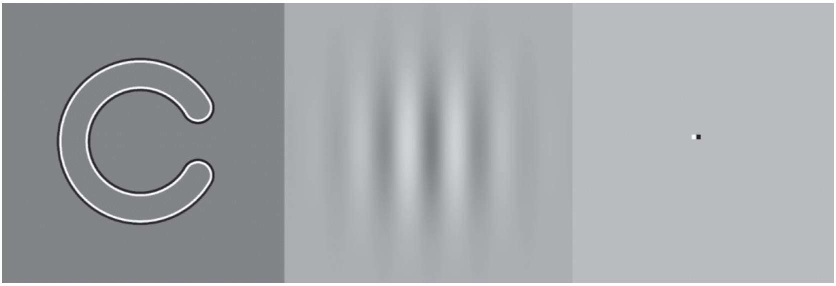


Рис. 2.8. Примеры исчезающих оптотипов [Шелепин и др., 1987]

требованиям: оптотипы, построенные на основе букв и на основе колец Ландольта [Шелепин и др., 1985; 1987; Волков и др., 1987; Коскин и др., 2005], и, наконец, решетки Габора.

Существуют два основных физических критерия оценки зависимости дистанции распознавания от профиля оптотипа. Первый из них — пространственно-частотный анализ оптотипов, второй — пространственный анализ. Значения верхней граничной частоты и дистанции распознавания имеют линейную зависимость. В силу законов оптики результаты частотного анализа должны соответствовать результату анализа пространственных свойств изображения, в данном случае размеру комбинаций черных и светлых полос в сложном контуре при фиксированном внешнем диаметре кольца оптотипа. Слияние с фоном исчезающих оптотипов обусловлено тем, что и более светлая, и более темная, чем серый фон, части исчезающей фигуры на пределе разрешения попадают под эффективную часть функции рассеяния оптики глаза. Если контур сложнее, нежели черно-белая пара, можно утверждать, что надо найти такую комбинацию, которая попадет под эффективную часть функции рассеяния и не будет отклика рецептивных полей. Эффективная часть функции рассеяния оптики глаза выбрана на основании критерия Рэлея. Эффективная ширина функции рассеяния точки, равная одной минуте, — это величина, всего лишь близкая к средней, так как критерий Рэлея — это статистический критерий. Наблюдатель в зависимости от условий может выбрать и другой уровень среза функции рассеяния.

Отдаляясь от оптотипа, можно установить пороговое для обнаружения и распознавания расстояние; для различных оптотипов (рис. 2.8) оно разное. Функция рассеяния согласована с рецептивными полями нейронов зрительной системы. В рецептивных полях происходит суммация слабого сигнала от нескольких рецепторов с тем, чтобы выделить его из шума. Увеличение размера рецептивного поля приводит к накоплению сигнала

и уменьшению помехи, так как увеличение размера позволяет накопить сигнал. Уменьшение размера рецептивных полей обеспечивает максимальное разрешение и тем самым передачу большего количества информации. Самые мелкие фовеолярные рецептивные поля, образованные из самых мелких колбочек, обеспечивают высокую остроту зрения и являются тем нейрофизиологическим механизмом, который осуществляет передачу в мозг изображений исчезающих оптотипов на пределе их распознавания. Отклик рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки определяется локальным контрастом относительно фона. На рис. 2.9 представлено согласование размеров рецептивного поля, функции рассеяния и матрицы рецепторов в фовеоле.

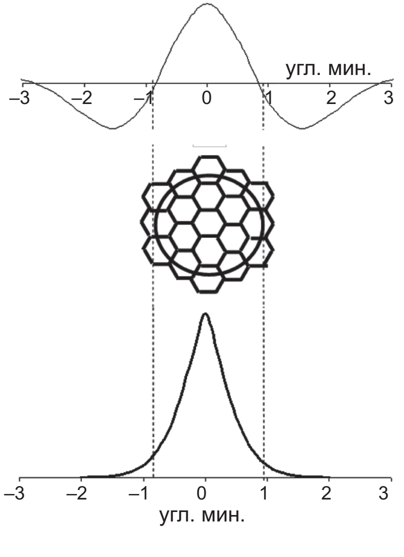


Рис. 2.9. Весовая функция рецептивного поля ганглиозной клетки сетчатки, мозаика рецепторов и функция рассеяния точки [Шелепин, Бондарко 2002]

Обратим внимание на то, что свойства света, дифракция, в данном случае описываемые функцией размытия точки, «организуют» максимально плотную гексагональную упаковку рецепторов и размеры рецептивных полей. В процессе эволюции происходит формирование такого устройства, как глаз, и систем обработки и понимания сформированных в нем изображений. Естественный отбор согласован со свойствами света. Точность согласования являлась критерием для корректировки в процессе отбора.

2.4. ОБЪЕКТИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ МЕТОДОМ ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Обычно остроту зрения определяют субъективным способом на основе ответов испытуемого, однако данный метод имеет ограничения. Это осознанное решение испытуемого о форме или ориентации тестового знака, требующее осознанного принятия решения об изображении. В принятие решения о тестовом знаке вовлечены помимо чисто зрительной другие системы мозга, и необходимы специальные приемы, чтобы выделить роль собственно зрительного анализатора. Применение психофизического метода измерений имеет и практические ограничения — он сложен при измерениях у грудных детей, у больных и раненых в бессознательном состоянии, в ходе хирургических вмешательств, в случаях симуляции и аггравации и т. д. Для объективной оценки остроты зрения (независимой от таких осознанных действий, как принятие решения о форме теста) может быть применен метод зрительных вызванных потенциалов по слабым изменениям электрической активности мозга в ответ на предъявление стимулов разного размера либо разной пространственной частоты. Электрофизиологически можно установить верхнюю граничную частоту, разрешающую способность зрительного анализатора и при необходимости — пересчитать разрешающую способность в условные единицы остроты зрения.

Работы в области измерения остроты зрения с помощью вызванных потенциалов проводятся уже около пятидесяти лет [Campbell, Maffei, 1970; Regan, 1989 и мн. др.]. Однако до сих пор этот метод сопряжен со значительными трудностями и точность измерения остается недостаточно высокой, так что некоторые авторы поставили под сомнение саму возможность точной оценки остроты зрения электрофизиологическими методами [Heravian et al., 1999]. Основным недостатком этого метода является вариабельность амплитуды вызванного потенциала. Снимает некоторые проблемы и вызывает другие метод sweep зрительных вызванных потенциалов, при котором испытуемому за короткое время предъявляется весь набор пространственных частот при высокой, около 20 Гц, временной частоте смены стимулов [Norcia, Tyler, 1985]. Такая высокая временная частота активирует преимущественно каналы, избирательные к этим частотам. Каналы, избирательные к высоким временным частотам, отражают работу магно- (крупно-) клеточных систем, имеющих малую пространственную разрешающую способность и большие рецептивные поля. Каналы, избирательные к низким временным частотам, отражают работу парво- (мелко-) клеточных систем — именно они имеют небольшие ре-

цептивные поля и определяют высокую пространственную разрешающую способность зрительной системы.

Поэтому точность измерения остроты зрения с помощью вызванных потенциалов существенно зависит от временной частоты предъявления стимулов. Полоса пропускания парвосистемы (которая обеспечивает высокую разрешающую способность) обычно не превышает 10—12 Гц, а полоса пропускания магносистем достигает 20—30 Гц. Граница между каналами колеблется от испытуемого к испытуемому, но доминирование одного из двух независимых проводящих каналов в зрительной системе в среднем происходит при увеличении частоты стимуляции свыше 8 Гц. Таким образом, частота стимуляции около 8 Гц в той или иной мере активирует оба канала. С нашей точки зрения, для быстрого решения многих клинических задач важно оценить состояние обеих систем, так как в реальных условиях наблюдения они работают вместе, поэтому оптимальной частотой стимуляции для определения остроты зрения с помощью зрительных вызванных потенциалов мы и принимаем частоту 8 Гц.

Однако анализ вызванных потенциалов в режиме стимуляции с частотой 8—12 Гц обычно затруднен из-за спонтанно возникающего альфа-ритма в электроэнцефалограмме, частота которого близка к частоте стимуляции, а амплитуда значительно превышает амплитуды регистрируемых ответов. Как следствие, сигнал искажается и возникают большие погрешности при определении остроты зрения с помощью зрительных вызванных потенциалов, особенно у испытуемых с доминированием в ЭЭГ альфа-ритма. Общепринятым способом оптимизации отношения сигнал/шум является увеличение количества усреднений ответов на каждый стимул, но при этом возрастет общее время обследования. С целью выделения вызванного потенциала (сигнала) из спонтанно возникающих ритмов ЭЭГ в данной ситуации шума мы применили метод независимых компонент, который позволяет разделить исходную ЭЭГ на несколько максимально независимых составляющих [Хараузов и др., 2005].

Была разработана универсальная методика для объективного измерения разрешающей способности и косвенно — остроты зрения с помощью зрительных вызванных потенциалов. Эта методика представляет интерес для возможности измерения одной из базовых характеристик зрения — разрешающей способности и остроты зрения почти вне сознания испытуемого. Специальные приемы по отвлечению внимания испытуемого делают ее незаменимой для измерения остроты зрения у симулянтов и агравантов. В нашем исследовании принимали участие двадцать шесть человек в возрасте от 17 до 25 лет с остротой зрения от 0,1 до 2,0. У каждого испытуемого оценивали как монокулярную, так и бинокулярную остроту зрения сначала электрофизиологическими методами, затем психофизиче-

скими. Результаты измерения разрешающей способности электорофизиологическим методом показаны на рис. 2.10.

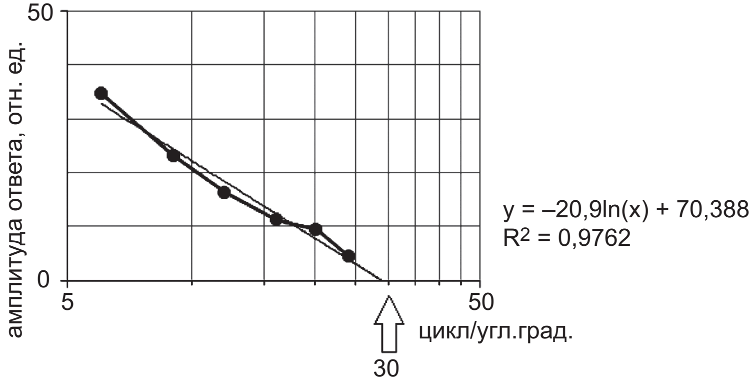


Рис. 2.10. Зависимость основных параметров вызванного потенциала (первой гармоники сигнала) от пространственной частоты стимула после обработки электроэнцефалограммы методом независимых компонент. По оси абсцисс — пространственная частота тестовых решеток (цикл/угл. град.); по оси ординат — размах (отн. ед.) вызванного потенциала [Хараузов и др., 2005]

Пересечение линии тренда с осью абсцисс указывает на верхнюю граничную пространственную частоту, разрешаемую системой. У данного здорового испытуемого эмметропа она равна примерно 30 цикл/угл. град., что следует и из психофизических данных, полученных у этого испытуемого.

Локализация источника потенциала, отражающего остроту зрения данного испытуемого, показана на рис. 2.11.

Из рис. 2.11 видно, что отклик самой высокой пространственной частоты можно получить только при отведении *Oz* от электрода на поверхности скальпа, расположенного над корковой проекцией фовеолярной области сетчатки, передающей в мозг высокие пространственные частоты.

Проверка эффективности методики была осуществлена следующим образом. У двух испытуемых расширяли зрачок каплями мидриацила, и с помощью собирающих (положительных) линз методом изменения рефракции снижали остроту зрения испытуемого. Полученные данные позволяют утверждать, что при соблюдении целого ряда условий возможно прогнозирование остроты зрения с помощью метода вызванных потенциалов с точностью, приближающейся к психофизическим измерениям. На рис. 2.9 стрелкой показано положение на оси абсцисс пространственной частоты равной 30 цикл/угл. град., что соответствует остроте зрения равной 1,0.

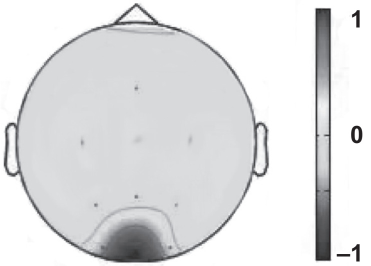


Рис. 2.11. Локализация на топограмме компонента ЭЭГ, выделенного с помощью метода независимых компонент, максимально отвечающего на зрительную стимуляцию. Точками показано местоположение регистрирующих электродов. Градация серого отражает значение сигнала [Хараузов и др., 2005]

ГЛАВА 3

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНАЯ КОНТРАСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА. ВИЗОКОНТРАСТОМЕТРИЯ

3.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОРОГОВ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И КОНТРАСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Первые измерения порогов и теоретические представления о восприятии, согласно преданиям, принадлежат еще Пифагору [цит. по: Липс, 1903]. И в практических целях контрастную чувствительность также измеряли с древнейших времен [см. обзор: Муравьева и др., 2010]. Так, например, в македонской армии существовал способ отбора наблюдателей для подразделений связи и разведки. Испытуемые должны были увидеть около семи звезд в созвездии Плеяд. В римской армии вместо Плеяд использовали две близкие друг к другу звезды в созвездии Большой Медведицы — Мицар и Алькор. Выбор звезд не был случайным: бледный Алькор расположен на расстоянии 12 угл. мин. от яркого Мицара, их можно разглядеть, только обладая хорошей контрастной чувствительностью при максимальной остроте зрения. Более того, испытуемые замечали штрих (гантель), а не раздельную пару и лишь догадывались о том, что там должно быть два источника света. Недаром по-арабски их называют то поясок, то всадник на лошади — эти названия отражают то, что наблюдатель с хо-

рошим зрением видит практически слитые воедино две звезды, большую и маленькую.

Шкалу размеров для звезд ввел еще Гиппарх, живший в период с 190 до приблизительно 120 года до нашей эры. Самые яркие он назвал звездами первой величины, а едва различимые невооруженным глазом — звездами шестой величины. Система звездных величин, по сути, описывала особенность нашего зрения; звезды как бесконечно малые точки разной яркости людям кажутся звездами разной величины. Отсюда и шкала «величин».

В новое время исследования контрастного порога были начаты французским гидрографом Пьером Бугером [Bouguer, 1760], который первым вывел формулу порогового контраста:

$$K_п = \Delta L/L,$$

где L — яркость источника; $K_п$— пороговый контраст.

В своих экспериментах он использовал простейшее оборудование — две свечи, расположенные на разном расстоянии от экрана (белой стены). Между первой свечой и экраном была расположена ширма, образующая на экране тень. Тень подсвечивалась второй свечой. Изменяя расстояния между экраном и свечами, Бугер менял яркость поверхностей и контраст тени. Он обнаружил, что тень различима, если отношение разности яркостей тени и фона к яркости фона не превышает 1/64, причем от абсолютного значения яркости эта величина не зависит. Таким образом, Бугер смог установить дифференциальный порог восприятия контраста (1,5–2 %). Это была прекрасная методика для получения первых результатов по так называемому слабо различимому порогу, который позже был назван пороговым контрастом. Психологи и физиологи XVIII века не обратили должного внимания на работу Бугера, но она сразу получила признание у оптиков, которые считают Пьера Бугера основоположником фотометрии. Особенность подхода Бугера была в том, что он исследовал как оптические свойства источников (то есть физику формирования воспринимаемого изображения — именно поэтому его считают основателем современной фотометрии), так и общие законы восприятия изображений. Поэтому было бы справедливо считать, что именно этой работой Бугера было положено начало психофизики в Новое время. На русском языке книга П. Бугера была издана в 1950 году в Издательстве Академии наук в серии «Классики наук» по инициативе академика С. И. Вавилова [Бугер, 1950].

Дальнейшие исследования в этой области были связаны с именами Эрнста Вебера [Weber, 1834] и Густава Фехнера [Fechner, 1858]. Вебер, как когда-то Бугер и Пифагор, определял пороги сенсорных раздражителей и «переоткрыл» психофизический закон, названный позже законом Вебера: минимальное различимое изменение величины стимуляции (ΔI) составляет постоянную долю (K) ее исходной величины (I):

$$K_п = \Delta I / I.$$

По существу, это закон Бугера—Вебера. Позднее эти исследования были продолжены Густавом Фехнером, который дополнил отношение Вебера величиной (Ln):

$$K_п = \Delta L / (L + Ln),$$

где Ln — «видимый свет сетчатки» по терминологии Фехнера и Гельмгольца, для здоровых наблюдателей величина, небольшая по численному значению.

Когда интенсивность стимула (L) достаточно большая, (Ln) можно пренебречь, и выражение будет соответствовать исходной формуле Бугера—Вебера. Константа (Ln) не только обеспечивает более точное соответствие экспериментальным данным, но имеет вполне реальное физическое и физиологическое объяснение. Фехнер и Гельмгольц называли его «видимым светом сетчатки»; в современной терминологии эта величина отражает значение внутреннего шума в сенсорном канале, который имеет различные источники — тепловой шум, самопроизвольный распад зрительного пигмента в рецепторах, случайный (не связанный с сигналом) выброс медиаторов, спонтанная активность сенсорных нейронов различных уровней. Этот шум можно наблюдать в полной темноте в виде вспыхивающих точек разной яркости — фосфенов, поэтому его и называли внутренним светом сетчатки. Позже Раштон находил еще много общего в работах Бугера и Фехнера, но показал и различия, основные — во временных характеристиках, которые необходимо учитывать при изучении влияния адаптации [Rushton, 1972].

Фехнер также предложил использовать дифференциальные пороги (понятие о которых впервые ввел Бугер) для построения шкалы интенсивности ощущений. Несколько ранее понятие порога ощущений как границы между сферой сознательного и бессознательного было предложено Гербартом [Herbart, 1824, цит. по: Бардин, 1976]. Фехнер сформулировал так называемый основной психофизический закон [Fechner, 1860], согласно которому интенсивность ощущения пропорциональна логарифму интенсивности стимула:

$$\psi = a \log (L / L_o),$$

где ψ — интенсивность ощущения; a — константа; L — интенсивность стимула; L_o — его абсолютный порог.

Предложенные Бугером приемы измерения контрастной чувствительности, основанные на варьировании расстояний между свечами и экраном, были хотя и просты, но недостаточно удобны для работы. Поэтому начались поиски технологически более удобных приемов исследования. Французский физик Антуан Филибер Массон для исследования порого-

вого контраста использовал быстро вращающийся диск из белой бумаги с короткими черными секторами [Masson, 1845]. Когда диск вращался достаточно быстро (около пятидесяти оборотов в секунду), черный и белый секторы сливались в однородный серый фон. Изменяя соотношение между площадями черного и белого секторов, можно было менять яркость диска: от белого до черного. Чтобы создать различные перепады яркости, Массон использовал диски с несколькими секторами различных радиусов. Минимально различимое значение перепада Массон называл пороговым контрастом. Он предложил также использовать измерение контрастной чувствительности с помощью дисков в клинической практике. Видимо, попытки клинического применения этого метода были осуществлены, так как Дондерс, Снеллен и Ландольт обсуждали клиническое значение применения диска Массона для измерения контрастного порога [Donders, 1864; Snellen, Landolt, 1874]. считали, что исследование контрастного порога может быть полезным дополнением к оценке остроты зрения с помощью буквенных таблиц [Цит. по: Муравьева и др., 2010].

3.2. ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Механизмы пространственного зрения человека, которые описывают форму, размер и взаиморасположение объектов, могут быть достаточно полно изучены с помощью пространственных частотно-контрастных характеристик [Shade, 1956; Campbell, Robson, 1968; Островская, 1969; Ginsburg, 1972; 1978; De Valois, De Valois, 1988; Глезер и др., 1975; Глезер, 1995; Бондарко и др., 1999; Шелепин и др., 1985; Шелепин, 2007; Муравьева и др., 2010]. Частотно-контрастная характеристика зрительной системы является одним из вариантов модуляционных передаточных функций. Эти функции определяют взаимосвязь входных и выходных сигналов в любой исследуемой системе (в нашем случае это зрительная система). Передаточная функция полностью определяет систему, если она линейна. Зная эту функцию, можно предсказать, какой сигнал будет на выходе системы при любом входном сигнале. Метод является универсальным для изучения линейных систем и позволяет на одном языке описывать как оптические свойства глаза, так и работу всего зрительного анализатора. Заранее следует сказать, что метод измерения модуляционных передаточных функций, получивший беспрецедентное распространение в технических системах передачи и обработки сигналов, для биологических систем ограничен условиями, при которых работа зрительной системы лишь приближается к линейной. Это серьезные ограничения. Однако для решения

огромного количества задач физиологической оптики и биофизики зрения они вполне приемлемы. Более того, становится возможным не просто говорить о нелинейностях, а измерять их в биологических системах.

Сущность метода заключается в изучении того, каким образом в исследуемой системе передаются различные частотные составляющие. Практически измерение модуляционных передаточных функций делается следующим образом. На вход системы подают синусоидальный сигнал одной частоты с заданными амплитудой и фазой; на выходе измеряют амплитуду и фазу выходного сигнала. Затем на вход подают другую частоту, но все той же амплитуды, затем третью частоту — и так весь набор частот, которые может передать исследуемая система. На выходе измеряют изменение амплитуды, фазы, частоты (формы) входного сигнала. Но еще раз необходимо подчеркнуть, что в большинстве условий наблюдения основные искажения сигнала можно свести к изменению амплитуд — и в этом доступность, простота, эффективность и огромная практическая значимость метода. По результатам измерений строят график зависимости величины (амплитуды) сигнала на выходе системы от частоты входного сигнала. На выходе сигнал может отличаться от входного, коэффициент усиления отражает отношение амплитуды выходного сигнала к входному сигналу заданной частоты (рис. 3.1).

Для оптики глаза эти синусоиды — изображений синусоидальных решеток, соответственно в плоскости тестового изображения и в плоскости изображения на сетчатке. L_{max} — максимальная яркость, L_{min} — минимальная яркость. Внизу даны примеры двумерных изображений — слева на входе и справа на выходе оптической системы глаза, сечения этих изображений представлены над ними.

При исследовании пространственных модуляционных передаточных функций зрительной системы измерения проводят в психофизических экспериментах. Экспериментатор изменяет глубину модуляции сигнала и по ответам испытуемого определяет пороговый контраст, при котором наблюдатель видит стимул. Рассмотрим метод измерения пространственных модуляционных передаточных функций без учета влияния временных характеристик сигнала, длины волны света и роли цвета. Поэтому в качестве сигналов выбираем черно-белые синусоидальные решетки разного контраста. Контраст (*K*) определяют по Майкельсону следующим образом:

$$K = L_{max} - L_{min} / L_{max} + L_{min},$$

где K — контраст; L_{max} — максимальная яркость в изображении синусоиды; L_{min} — минимальная яркость в изображении синусоиды.

Еще одна важная характеристика тестовой решетки — пространственная частота. Пространственную частоту измеряют в числе периодов изменения яркости на ширину экрана или листа бумаги, на которой решетка

Принцип измерения модуляционной передаточной характеристики системы

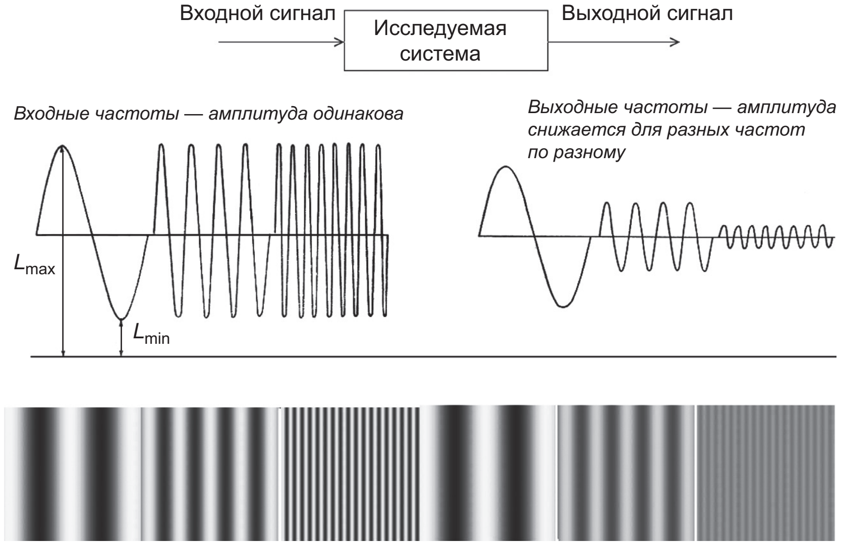


Рис. 3.1. Синусоидальные сигналы с разной частотой на входе системы и затухание сигнала на выходе системы, разное для разных частот

изображена. В этих единицах измерений пространственная частота зависит только от числа штрихов (периодов) на экране или листе и не зависит от удаленности наблюдателя от экрана. Но при решении задач физиологической оптики необходимо принимать во внимание удаленность наблюдателя от экрана, и для этого используют другую величину — число периодов на угловой градус. Чтобы рассчитать пространственную частоту в циклах на угловой градус, надо знать, чему равен один градус (1 град.) при данной удаленности наблюдателя от экрана.

Так, при расстоянии от наблюдателя до экрана в R см одному угловому градусу соответствует отрезок приблизительно $2\varpi R/360$. Для R, равного 150 см, 1 град. занимает 2,6 см, если на этом участке укладывается один период решетки (одна черная и одна светлая полоса), то пространственная частота данной решетки равна одному циклу на угловой градус. В физиологической оптике применяют тестовые изображения в виде синусоидальных (косинусоидальных) решеток или в виде синусоидальных решеток, промодулированных по закону Гаусса. Такие сигналы в настоящее время общеприняты, мы также их используем в повседневной работе — они получили название «решетка Габора». Пространственную частоту можно из-

менить или увеличением числа полос в решетке, сохранив при этом постоянными размеры решетки и удаленность от нее, или, оставив постоянным число полос, изменить удаленность наблюдателя от теста.

Пример измерения пространственной частоты в циклах на угловой градус приведен на рис. 3.2: показана решетка Габора (синусоида, модулированная по закону Гаусса), иллюстрируются значения пространственной частоты в циклах на объект (константа в данном примере) и в циклах/угл. град. (переменная величина, зависит от удаленности).

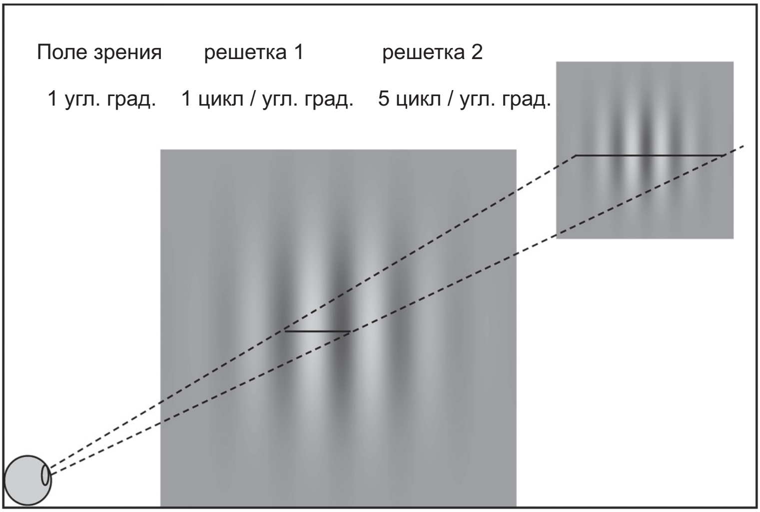


Рис. 3.2. Принцип измерения угловой пространственной частоты

В данном случае предъявлена решетка Габора с числом полос, равным пяти, то есть с частотой пять циклов на изображении. Решетка расположена на разных удаленностях от наблюдателя, это приводит к изменению пространственной частоты решетки относительно наблюдателя. Пространственная частота измеряется в данных условиях в цикл/угл. град. Это наиболее принятый и наиболее удобный вид измерения. Однако в решении ряда оптических задач, задач полиграфии широко применяется представление (измерение) пространственной частоты в циклах на изображение или в циклах на см изображения.

Модуляционную передаточную функцию зрительной системы в чистом виде можно измерить только для оптики глаза. Для этого перед глазом располагают тестовые решетки разной пространственной частоты, но одного максимального контраста, а на дне глаза с помощью микрофото-

метра измеряют контраст изображения этой решетки. Микрофотометр с измерительным торцом меньше одного микрона — стеклянный микроэлектрод — располагают на глазном дне торцом к свету. Микроэлектрод соединен с фотоумножителем или современным высокочувствительным фотоэлементом. На выходе фотоэлемента величина электрического сигнала пропорциональна яркости на торце микроэлектрода. Тестовую решетку медленно протягивают в поле зрения. Электрический сигнал отображает профиль решетки на глазном дне (см. рис. 2.5, изображение трехшпальной миры справа внизу и кривая выхода с радиометра, подсоединенного к микроэлектроду). Далее можно измерить максимальное и минимальное значения яркости и по формуле Майкельсона определить контраст решетки. По значениям контраста для решеток всех пространственных частот строят модуляционную передаточную характеристику оптики глаза. Уменьшение контраста на высоких пространственных частотах характеризует оптику глаза и определяется его оптическими свойствами — дифракцией, аберрацией, фокусировкой и т. д. Модуляционную передаточную функцию всей зрительной системы можно определить лишь косвенно, на основе ответов испытуемого. Для этого на вход зрительной системы подают сигналы изменяющегося контраста. Измеряют по ответам испытуемого пороговый контраст, то есть контраст столь малой величины, какой только может заметить испытуемый. В этом отличие изучения передаточных функций живых сенсорных систем от систем технических (рис. 3.3).

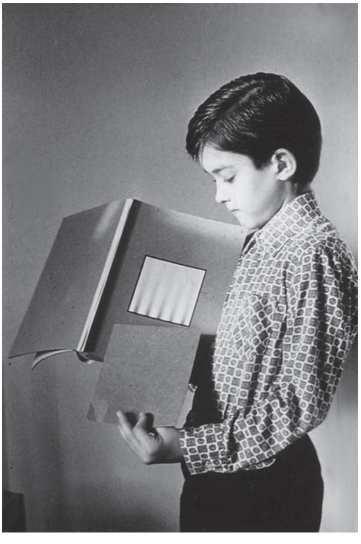


Рис. 3.3. Измерение частотно-контрастной чувствительности глаза. Атлас тестовых изображений содержит разные пространственные частоты. Каждая частота — на отдельном листе атласа. Контраст от нулевого сверху нарастает к единичному внизу решетки. С помощью маски исследователь предъявляет разный контраст для данной пространственной частоты

График частотно-контрастной характеристики, представленный на рис. 3.4, построен на основании измерения пороговых значений изменения контраста для каждой пространственной частоты. Теперь для проведения подобных измерений вместо атласа потребуются переносной персональный компьютер, дисплей (ноутбук) и соответствующее программное обеспечение, разработанное С. В. Прониным в лаборатории физиологии зрения Института физиологии имени И. П. Павлова.

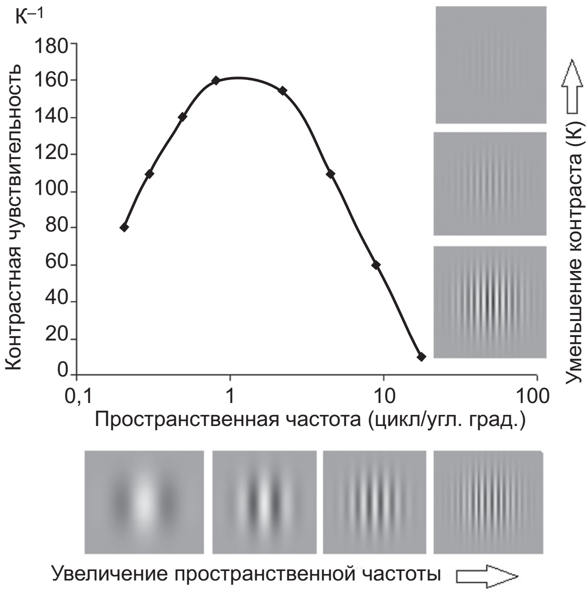


Рис. 3.4. Частотно-контрастная характеристика конкретного испытуемого (средние значения чувствительности выше). По оси абсцисс — пространственная частота (цикл/угл. град.). По оси ординат контрастная чувствительность — величина, обратная контрасту тестового изображения, *1/К*, где *К* — контраст. Внизу изображены примеры возрастания тестовых пространственных частот. Справа изображен принцип изменения контраста для одной максимально высокой пространственной частоты. Аналогичный прием снижения контраста для поиска порогового значения использован для каждой тестовой частоты

Измерить собственную частотно-контрастную характеристику (правда, в упрощенном виде) можно, обратившись к рис. 3.5. Данный рисунок построен таким образом, что в нем слева направо изменяется пространственная частота, а снизу вверх изменяется контраст. Слева — низкие пространственные частоты, справа — высокие. Контраст уменьшается снизу

вверх одинаково для всех полос в данном тестовом изображении. Однако у наблюдателя возникают другие ощущения: не все полосы в решетке переменного контраста видны до самого конца. Иными словами, испытуемый видит, что у каждой полосы есть свой предельный контраст, при котором она еще видна.

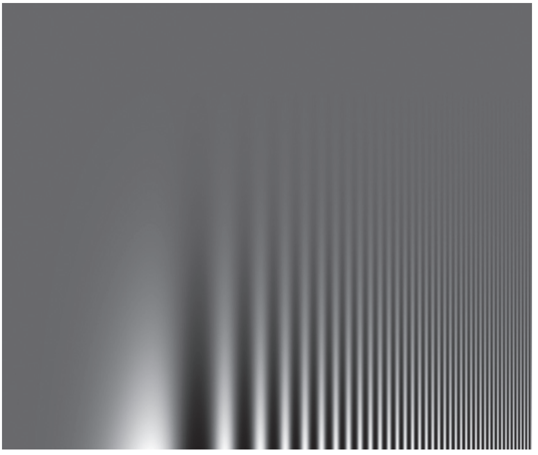


Рис. 3.5. Синусоидальная решетка с переменной пространственной частотой и контрастом. По оси абсцисс — пространственная частота в циклах/угл. град. По оси ординат — контраст

Если смотреть на рис. 3.5 с расстояния вытянутой руки, то лучше всего будут видны полосы в решетке средней пространственной частоты; полосы, как кажется, продолжаются и выше. При этом расстоянии хуже видны полосы высокой и низкой пространственной частоты. Мысленно можно провести кривую контрастной чувствительности на изображении решетки, и эта кривая будет напоминать график на рис. 3.4, который построен другим способом, то есть в результате последовательного предъявления решеток разной пространственной частоты и разного контраста. Однако общий вид кривой сохранится.

Особое удивление вызывает снижение чувствительности в области низких пространственных частот. Чтобы удостовериться в том, что все полосы в решетке одного контраста, надо отойти от рис. 3.5 на расстояние двух метров, и тогда лучше всего станут видны не средние полосы, а крайние левые. Наоборот, приблизив рисунок максимально близко к лицу (15 см), можно увидеть, как максимум «сползет» вправо, и низкие частоты, хорошо видимые на удалении, будут видны плохо и даже совсем плохо. Измене-

ние удаленности привело к изменению пространственной частоты в цикл/угл. град., а чувствительность лучше всего проявляется в области средних пространственных частот. Отодвинувшись от рисунка, мы сместили область средних пространственных частот в цикл/угл. град. влево. Принцип этой простейшей геометрической зависимости и был представлен на рис. 3.4.

Несмотря на множество различий в способах измерения, общий вид частотно-контрастной характеристики довольно типичен. Контрастная чувствительность минимальна (равна нулю) при нулевой пространственной частоте и равна нулю при верхней граничной частоте, принимаемой условно 60 цикл/угл. град.; в действительности обычно она не превышает 30 цикл/угл. град. Практически измерить чувствительность в области крайне низких и крайне высоких пространственных частот затруднительно, поэтому чаще измеряют тот диапазон, который представлен на рис. 3.4.

Максимальная чувствительность зрительной системы человека находится в области средних пространственных частот от 1 до 7 цикл/угл. град. Максимум изменяется в зависимости от средней яркости стимула и адаптации глаза. Предельный видимый диапазон пространственных частот захватывает область не ниже нулевой пространственной частоты (которую практически предъявить невозможно) до самой высокой расчетной пространственной частоты в 60 цикл/угл. град. (которую практически невозможно увидеть).

Модуляционная передаточная характеристика оптики глаза зависит от уровня яркости. Это влияние достаточно просто и определяется диаметром зрачка. Управление зрачком таково, что при низких уровнях яркости зрачок расширен и доминирующую роль играют аберрации. На очень высоких уровнях, при сильно суженном зрачке, превалирует дифракция. В сумерках освещенность сетчатки уменьшается, автоматически увеличивается диаметр зрачка. Увеличение диаметра зрачка более 2,5 мм приводит к уменьшению верхней граничной частоты за счет аберраций. Это одна из причин сумеречной близорукости всех людей даже с эмметропической рефракцией. При миопии без коррекции расширение зрачка резко ухудшает качество изображения за счет аберраций, поэтому люди с миопической рефракцией в сумерках видят очень плохо, если для коррекции нарушений оптики не используют соответствующие линзы. Максимальная разрешающая способность (верхняя граничная частота) в 30 цикл/угл. град. возможна, если яркость изображения и соответственно уровень освещенности сетчатки достаточно велики, контраст стимула максимальный, а аберрации малы. Такую верхнюю граничную частоту оптика глаза может передать лишь при диаметре зрачка в 2,5 мм. При данном диаметре обеспечен оптимальный баланс между условиями, которые приводят к дифракции или к аберрации изображения на сетчатке. Например, уве-

личение диаметра зрачка приводит к уменьшению верхней граничной частоты и к усилению аберраций. При уменьшении диаметра зрачка менее 2,0 мм качество изображения ухудшается из-за дифракции.

От уровня яркости зависит и частотно-контрастная характеристика всей зрительной системы. Надо отметить, существенные изменения претерпевает нервный отдел при воздействии света разной яркости. Изменение яркости изменяет уровень адаптации глаза. Верхняя граничная пространственная частота и вся кривая контрастной чувствительности всей зрительной системы зависят от уровня адаптации. Для измерения частотно-контрастных характеристик имеет смысл использовать адаптационные уровни не менее 0,032 кд/м кв. — такой бывает освещенность белой бумаги в полнолуние. При низких уровнях освещенности человек воспринимает только низкие пространственные частоты и острота зрения мала. Соответственно верхняя граничная частота на частотно-контрастной характеристике сдвинута в низкочастотную область. С увеличением освещенности острота зрения и верхняя граничная частота растут. Эти эффекты связаны с перестройкой рецептивных полей нейронов ганглиозных клеток сетчатки. Адаптация глаза позволяет работать практически в диапазоне двенадцати логарифмических единиц яркости источника света.

Адаптация осуществляется на уровне первичных звеньев зрительной системы [Бызов, Кузнецова, 1979; Rushton, 1972]. Создана работающая модель глобальной относительно медленной адаптации по большому участку поля зрения, имитирующая систему «рецепторы — биполяры — горизонтальные клетки», а для локальных быстрых изменений яркости — «рецепторы — биполяры — амакриновые клетки» [Красильников, 1997].

В области высоких и низких пространственных частот, в пороговых условиях, чувствительность человека снижена. В области высоких пространственных частот чувствительность лимитируется оптикой глаза и шумом дискретизации, в области низких — торможением в рецептивных полях и уровнем внутреннего шума, эффективная величина которого возрастает с уменьшением пространственной частоты [Красильников, Шелепин, 1996 а; 1996 б].

Контрастная чувствительность в норме зависит от ряда факторов, таких как рефракция, дифракция и аберрации глаза, яркость, ориентация и размер тестовых решеток, и, наконец, положение тестовых решеток в поле зрения — их эксцентриситет от точки фиксации взора [Campbell, 1980; Campbell, Green, 1965; Campbell, Gubisch, 1966; Campbell, Kulikowski, 1966; Campbell, Robson, 1968; Virsu, Rovamo, 1979].

На рис. 3.6 слева изображено семейство пространственно-частотных характеристик в зависимости от положения теста в поле зрения. Цифры у кривых — эксцентриситет, удаленность от точки фиксации взора в угл. град.

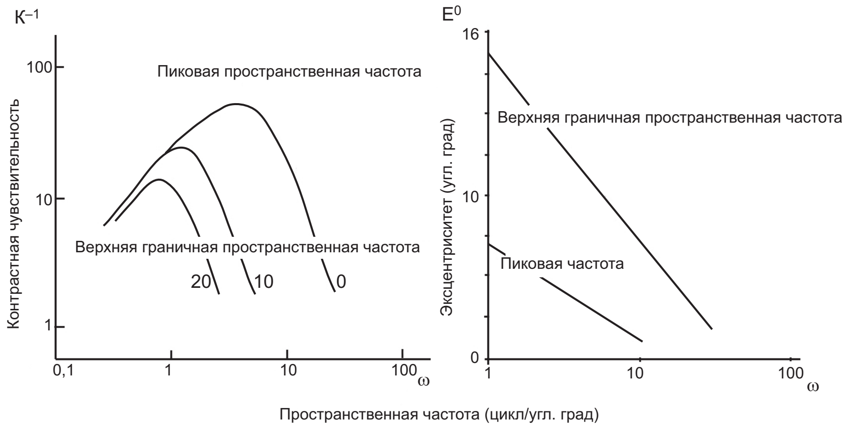


Рис. 3.6. Частотно-контрастная характеристика различных участков сетчатки (в зависимости от эксцентриситета в поле зрения наблюдателя)

Смещение чувствительности в область низких частот с эксцентриситетом для верхней граничной частоты (выбираемой произвольно на основании заданного критерия) и для пиковой (максимальной на кривой контрастной чувствительности) пространственной частоты графически представлено на рис. 3.6 справа. Это смещение обусловлено тем, что в центре поля зрения представлены преимущественно мелкие рецептивные поля, а на периферии — все более крупные. Мелкие рецептивные поля передают высокие пространственные частоты, а крупные — низкие. Демонстрация передачи информации в головной мозг рецептивными полями ганглиозных клеток разных участков сетчатки (в зависимости от эксцентриситета) представлена на рис. 3.7.

На рис. 3.7 представлено смоделированное методами цифровой обработки изображений описание лица, которое передается от сетчатки в мозг при условии фиксации взора. Нетрудно увидеть, что изображение размыто с удалением от точки фиксации в соответствии с закономерностью, изображенной на рис 3.6. Чтобы получить аналогичный или близкий эффект при рассмотрении правого рисунка, его необходимо увеличить приблизительно до 30 угл. град. и фиксировать взор на зрачке правого глаза портрета девушки. При этом размытие, подобное представленному на рис. 3.7 слева, наблюдатель ощущать не будет — он ощутит нечеткость восприятия периферии (это происходит ежесекундно и в повседневной жизни). Отсутствие размытости изображений на периферии обусловлено тем, что на периферии поля зрения нет элементов, выделяющих высокие простран-



Рис. 3.7. Слева — исходное изображение лица; справа — моделирование методами цифровой обработки изображений описания лица, которое передается от сетчатки в мозг. Результат моделирования учитывает размытие исходного изображения методом цифровой обработки изображений при условии фиксации испытуемым своего взора на правом зрачке портрета девушки

ственные частоты, а заметить размытие изображения можно только при их наличии. Размытость легко заметна при изменении фокусировки и ухудшении изображения на сетчатке в области фовеа, где есть элементы, выделяющие как высокие, так и низкие пространственные частоты. Человек всегда замечает разницу в активации элементов, выделяющих высокие и низкие частоты в фовеа, например при близорукости без коррекции или если эмметроп смотрит на мир через плюсовые стекла. Зависимость контрастной чувствительности от рефракции показана на рис. 3.8.

Кривая модуляционной передаточной характеристики оптики глаза имеет резкое снижение в правой высокочастотной ветви и в области высоких пространственных частот. Ухудшение передачи оптикой глаза высоких пространственных частот начинается с 4 цикл/угл. град., и чем выше частота, тем передача хуже. По расчетам, максимально высокая пространственная частота, передаваемая оптикой нормального, то есть эмметропического (имеющего правильную фокусировку изображения на сетчатке), глаза человека в пределе составит около 60 цикл/угл. град.; более высокие частоты оптика глаза передать не может. Эта особенность приводит к тому, что не все детали объекта могут быть отражены в его изображении на сетчатке. Самую высокую частоту, которую еще видит человек, назы-

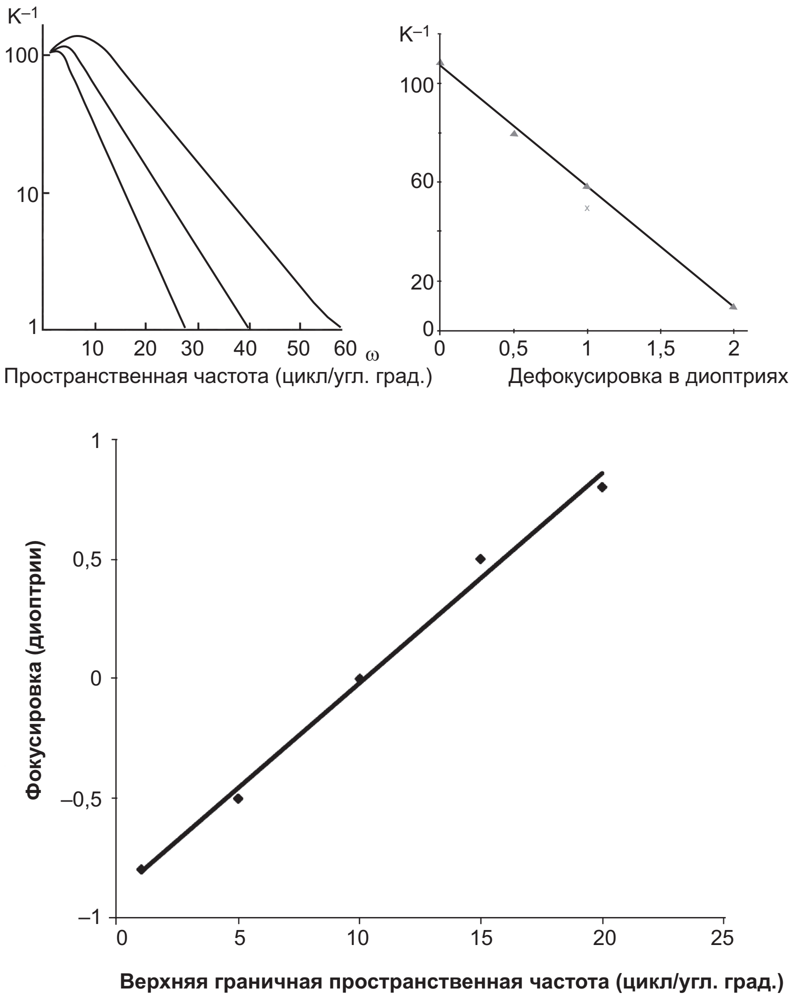


Рис. 3.8. Частотно-контрастная характеристика в зависимости от рефракции глаза наблюдателя (верхний левый рисунок); ось абсцисс изображена в линейном масштабе, поэтому правая высокочастотная часть кривой растянута для демонстрации важности этого отдела при определении остроты зрения как верхней граничной частоты. Разные кривые получены при различной степени дефокусировки. Верхний правый рисунок — зависимость максимума контрастной чувствительности от дефокусировки для решетки с пространственной частотой 15 цикл/угл. град. Нижний рисунок — зависимость верхней граничной частоты от фокусировки в диоптриях [Campbell, Green, 1965; Шелепин и др., 1985]

вают верхней граничной частотой. Обратная ей величина, то есть период решетки, соответствует величине остроты зрения. Она зависит от таких структурных особенностей оптики глаза, как фокусное расстояние и диаметр зрачка. На спектральном языке оптика глаза представляет собой фильтр низких частот. В реальной зрительной системе эмметропического глаза без искажений передаются частоты значительно меньше 60 цикл/угл. град. — всего лишь до 30 цикл/угл. град. Соответственно период этих решеток составляет 1 и 2 угл. мин. Данное ограничение при малом зрачке обусловлено дифракцией.

Между остротой зрения и контрастной чувствительностью имеется вполне определенная зависимость, см. рис. 3.9.

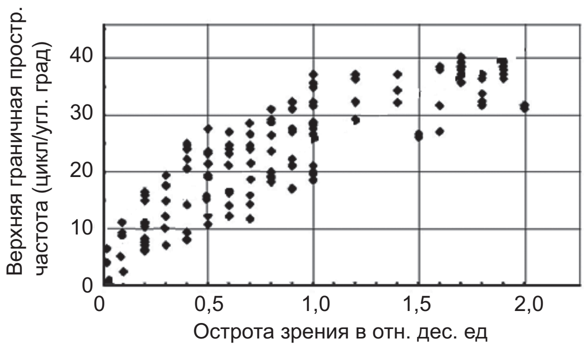


Рис. 3.9. Верхняя граничная пространственная частота в циклах на угл. град. (ось ординат) и остроты зрения в относительных десятичных единицах (ось абсцис)

На рис. 3.9 мы видим почти линейную зависимость остроты зрения, измеренной по буквенным оптотипам до 1,0, что соответствует верхней граничной частоте в 30 цикл/угл. град. Именно эта пространственная частота хорошо передается оптикой глаза и соответствует характеристикам рецептивных полей.

Отклонение рефракции глаза от эмметропической приводит к изменению вида модуляционной передаточной функции. Обычно ухудшается передача высоких пространственных частот вследствие ухудшения фокусировки изображения на сетчатке. Например, чем сильнее миопическая рефракция глаза испытуемого, тем сильнее влево, в область низких пространственных частот, сдвигается правая ветвь кривой частотно-контрастной характеристики (см. рис. 1.4, 3.7, 3.10).

При монокулярных измерениях контрастной чувствительности ответы левого и правого глаза у людей с нормальным бинокулярным зрени-



Рис. 3.10. Разные пространственно-частотные характеристики, демонстрирующие различные полосы видимых пространственных частот (определяемые различиями в верхней граничной частоте двух испытуемых). На графиках видимая полоса пространственных частот ограничена кривой

ем практически идентичны. При наличии различий оптики глаз либо при патологии в сетчатке или проводящих путях можно обнаружить отличия в ответах (которые тем больше, чем больше степень поражения больного глаза). При бинокулярных измерениях контрастная чувствительность выше, по данным разных авторов, не более чем в 1,3–1,6 раза по сравнению с монокулярным наблюдением [Муравьева и др., 2010; Глезер, Цуккерман, 1961; Campbell, 1968; 1974; 1980].

В заключение отметим, что, несмотря на ряд существенных ограничений, пространственно-частотный анализ в настоящее время является единственным инструментом для оценки функциональных возможностей пространственного зрения человека. Практическое применение сводится к измерению контрастной чувствительности человека к синусоидальным решеткам различной пространственной частоты и к построению частотно-контрастных характеристик зрительной системы. Частотно-контрастная характеристика отражает видимый человеком в пороговых условиях наблюдения пространственно-частотный диапазон. Различные звенья зрительного анализатора — оптика глаза и нервная часть — различным образом ограничивают видимый пространственно-частотный диапазон. Ухудшение состояния оптики глаза приводит к снижению чувствитель-

ности в области высоких пространственных частот. Ухудшение состояния нервного отдела зрительного анализатора приводит к снижению чувствительности в любом участке видимого диапазона в области низких, средних и высоких пространственных частот. Снижение в области низких пространственных частот имеет большую диагностическую ценность, так как отражает нарушения в нервной системе, которые нельзя обнаружить традиционными методами измерения остроты зрения. Однако основным клиническим методом оценки функционального состояния глаза, единственным методом подбора очков, методом, определяющим верхнюю граничную пространственную частоту, определяющую полосу пропускаемых пространственных частот, является метод оценки остроты зрения.

ГЛАВА 4

ВНУТРЕННИЙ ШУМ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

4.1. ПОМЕХА И ВНУТРЕННИЙ ШУМ СИСТЕМЫ КАК ФАКТОР ОГРАНИЧЕНИЯ ВОСПРИЯТИЯ

Важнейшими факторами, ограничивающими точность распознавания и чувствительность обнаружения сигнала в пороговых условиях, являются внешняя помеха и внутренний шум зрительной системы. Внешний шум как фактор, ограничивающий восприятие, зачастую очевиден: снегопад, дождь, туман, дым, листва падающая и листва-фон, трава как фон, самая разнообразная искусственная маскировка, фотонный шум. Внешняя помеха может перекрывать наблюдаемый объект, а может лишь его окружать. Распознавание в этом случае сводится к выделению фигуры из фона. Внешняя помеха может быть аддитивная и мультипликативная [Красильников, 1958; 1986; 2011]. В процессе эволюции чувствительность и помехоустойчивость системы определялась условиями обитания [Фирсов, Говардовский, 1990; 2000; Тибилов, 2013; Васильев, Тибилов, 2018; Barlow, 1978; 1980; 1999].

Чтобы улучшить отношение сигнал/шум, рецептивные поля для ночного зрения (палочковые) имеют большие размеры. В больших рецептивных полях легче осуществить накопление сигнала, хотя при этом проис-

ходит потеря разрешающей способности [Глезер, Цуккерман, 1961; 1986; 2011]. Помимо внешней помехи, которая зависит от условий наблюдения и определяет отношение сигнал/шум входного изображения, искажать входной сигнал может еще и внутренний шум. Внутренний шум — это собирательное понятие, так как имеются различные его источники, на разных уровнях зрительной системы. Уже на первом каскаде, на уровне фоторецепторов — это может быть и мембранный шум, и шум дискретизации. На последующих этапах внутренний шум связан в первую очередь с самопроизвольным выбросом медиаторов, и он присутствует во всех звеньях зрительной системы. Его величина различна в разные возрастные периоды жизни человека. У детей уровень внутреннего шума выше и поглощение фотонов хуже, чем у взрослых, в сто раз. Изменяется он и от функционального состояния, возрастает при патологии.

Понятия внутреннего шума и его величины вошли в основной психофизический закон. Он введен Фехнером в знаменатель уравнения Бугера—Вебера как собственный «свет» сетчатки. Без представления о внутреннем шуме принципы восприятия понять невозможно. Природа данного явления — в «тепловом шуме», самопроизвольном разложении зрительного пигмента в рецепторах. В результате хорошо изученной цепи биохимических процессов [Говардовский, 2007; Островский, 2007] во внешнем сегменте фоторецептора поглощенный квант света вызывает электрический отклик, являющийся началом зрительного ответа на внешний раздражитель. Ощущение света возникает при любом виде раздражения первичной зрительной системы. Любые сбои в деятельности зрительной системы в соответствии с законом Мюллера о специфической энергии органов чувств приводят к зрительному ощущению. В результате самопроизвольного распада зрительных пигментов, например в результате теплового движения молекул, может возрастать внутренний шум. Самопроизвольный выброс медиатора в синаптических щелях вызывает синаптический шум. Эти выбросы изменяют случайным образом проницаемость синаптической мембраны, что приводит к самопроизвольным разрядам клеток. Величина внутреннего шума возрастает при целом ряде заболеваний, поэтому его измерение имеет большое практическое значение. Измерения внутреннего шума, по предложению Н. Н. Красильникова, осуществляют косвенно как эквивалентного. Пример результата измерений частотно-контрастных характеристик в условиях помехи дан на рис. 4.1.

Эти явления можно не только измерить, но и промоделировать. На вход зрительной системы подается сигнал — решетки разной пространственной частоты, измеряется контрастная чувствительность. К входному сигналу, решетке, добавляется помеха. Меняя значение среднеквадратического отклонения или контраста пикселей, образующих помеху, можно

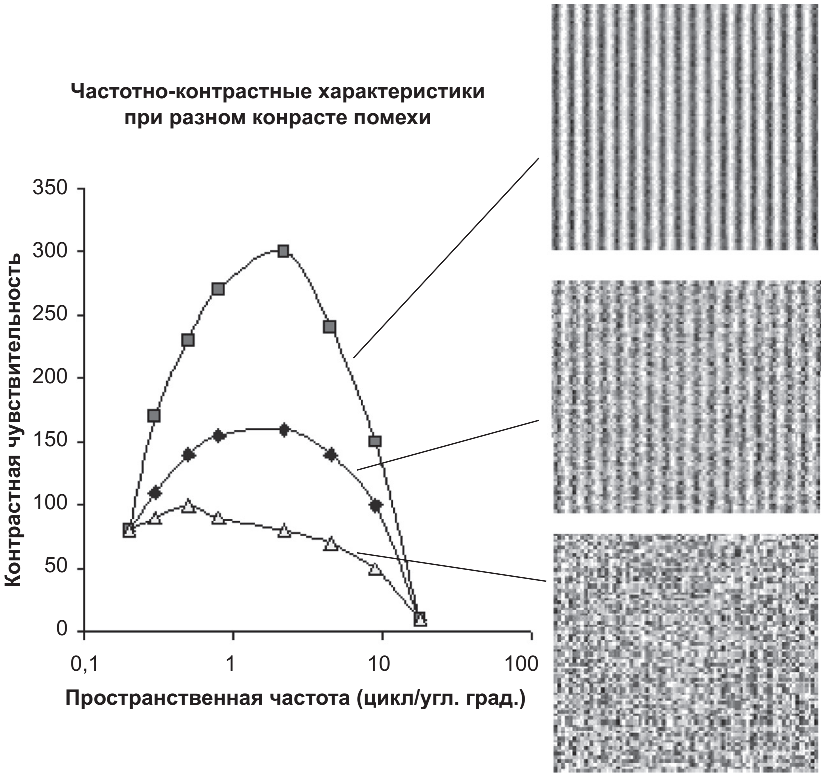


Рис. 4.1. Частотно-контрастная характеристика у здорового наблюдателя при различном уровне (среднеквадратическом отклонении) контраста внешней помехи (справа — пример решетки одной пространственной частоты и контраста, но с разным контрастом помехи)

измерить уровень внутреннего шума как эквивалентного. Обычно применяют широкополосную помеху — внешний квазибелый аддитивный шум [Красильников, 1958; 1986; Красильников, Шелепин, 1996 а; 1996 б; Шелепин и др., 1999; Бондарко и др., 1999].

Укажем, что помимо величины внутреннего шума мы обратили внимание на его пространственно-частотные характеристики. Ведь обычно предполагается, что пространственно-частотный спектр внутреннего шума белый. Для изучения механизмов пространственного зрения решающими являются пространственные характеристики внутреннего шума. Результаты проведенных нами исследований позволили установить важнейший экспериментальный факт — окраску внутреннего шума взрослого человека и то, что

у новорожденных он практически белый. Внутренний шум имеет подъем в области низких и высоких пространственных частот. Эти подъемы имеют разную природу. Контрастный внутренний шум в низко- и среднечастотной области пространственных частот определяется характеристиками связей горизонтальных клеток сетчатки. В пространственно-высокочастотной области значение внутреннего шума — это практически шум дискретизации изображения, осуществляемый мозаикой фоторецепторов.

Величина внутреннего шума максимально снижена в области средних пространственных частот. Максимум величины внутреннего шума взрослого человека находится в области низких пространственных частот, а минимум — в области средних. На основании этой установленной нами закономерности мы сделали предположение, что спектр внутреннего шума определяет вид пространственно-частотной характеристики зрительной системы (рис. 4.2). А именно он определяет спад чувствительности в области низких пространственных частот там, где внутренний шум велик, и подъем в области средних частот там, где влияние внутреннего шума уменьшает работа рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки и нейронов зрительной коры. Традиционные попытки объяснить этот спад только тормозной периферией рецептивных полей при количественной проверке не увенчались успехом.

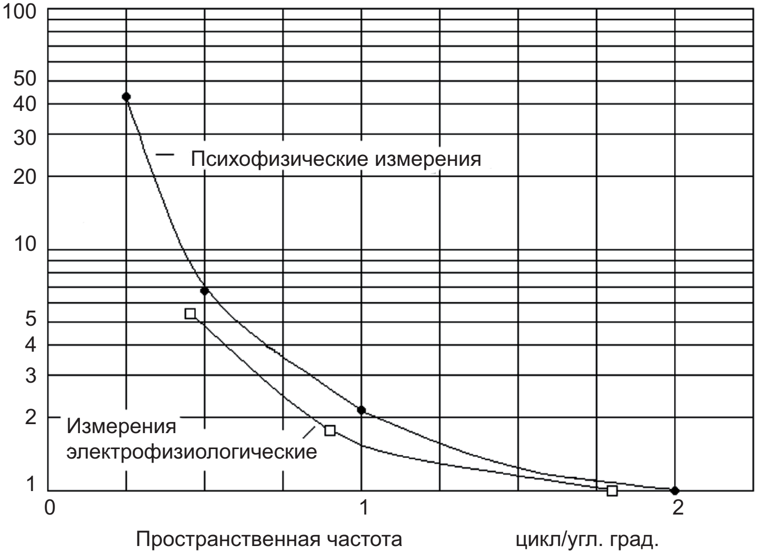


Рис. 4.2. Пространственно-частотный спектр внутреннего шума зрительной системы [Krasilnikov et al., 2000; Shelepin et al., 2000]

Показано, что уровень внутреннего шума — мера состояния зрительного анализатора. Источники внутреннего шума различны в разных звеньях. Для их исследования требуются различные методы. Установлен повышенный уровень внутреннего шума у больных с поражениями зрительной системы.

Вернемся к пространственной дискретизации воспринимаемых изображений на уровне фоторецепторов как источнику шума. Функция размытия идеальным способом подогнана к размерам рецепторов и размеру рецептивного поля. Для уменьшения шума дискретизации изображение в норме при эмметропии слегка размыто относительно размеров рецептивных полей. Показано, что снижение величины шума дискретизации обеспечивается как оптической функцией рассеяния, так и в рецептивных полях ганглиозных клеток сетчатки. Рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки уменьшают величину этого шума в области средних пространственных частот за счет пространственного и временного накопления. Рецептивные поля зрительной коры минимизируют помеху в соответствии с геометрией входного сигнала. Это обеспечивают рецептивные поля нейронов зрительной коры. Показано, каким образом конструкция рецептивных полей зрительной коры согласована со статистическими характеристиками изображений окружающего мира. Нарушение работы рецептивных полей приводит к развитию фильтрационной агнозии при нейроофтальмологических заболеваниях. Термин «фильтрационная агнозия» ввел И. И. Цуккерман на основе результатов клинических наблюдений И. М. Тонконогого, Я. А. Меерсона, Е. П. Кок и других исследователей для случаев плохого выделения сигнала из шума больными с локальными поражениями головного мозга [Тонконогий, Цуккерман. 1963]. Помимо поражения определенных нейронных сетей, обеспечивающих выделение сигнала из шума и распознавания, развитие фильтрационной агнозии сопровождается увеличением внутреннего шума. Уровень внутреннего шума возрастает в результате самых разных заболеваний, и его измерение теперь стало доступным [Красильников, Шелепин, 1996 а; 1996 б; Дешкович, Шелепин, 2000].

Созревание горизонтальных связей в течение первых лет жизни позволяет уменьшить значение внутреннего шума в области средних пространственных частот за счет улучшения накопления сигнала в пределах рецептивного поля. Поэтому у ребенка в первые годы с каждым месяцем жизни контрастная чувствительность повышается в области средних пространственных частот. С каждым годом до семи лет контрастная чувствительность растет в области средних и высоких пространственных частот и практически не меняется в области низких. Повышение контрастной чувствительности в области средних пространственных частот происходит за счет снижения контрастного внутреннего шума, это достигает-

ся благодаря улучшению характеристик рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки и зрительной коры. Другой механизм улучшения в онтогенезе чувствительности в области высоких пространственных частот развивается благодаря созреванию фовеолы, появлению мелких рецепторов, более плотной их упаковки. В результате уменьшается шум дискретизации в высокочастотной области. Рецепторы лучше захватывают фотоны. Частотно-контрастная характеристика приобретает вид характеристики, присущей взрослому человеку.

4.2. КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХИ

На основе теории статистических решений еще в 50-е годы прошлого века Н. Н. Красильниковым была разработана модель согласованной фильтрации в зрительной системе человека. Было установлено, что человек распознает простые фигуры на фоне случайной помехи почти так же, как и оптимальный наблюдатель. Это довольно близко к тому, что делает идеальный наблюдатель, но имеются некоторые отличия. Для описания этих отличий был введен коэффициент эффективности наблюдателя [Barlow, 1978; 1980; 1999; Burgess et al., 1981]. Коэффициент эффективности является мерой расхождения между результатами, которые получены в опытах с данным испытуемым при распознавании объектов, и результатами, которые получены в опытах с идеальным наблюдателем, моделью, осуществляющей распознавание этих же объектов в условиях помехи [Красильников 1958; 1986; Красильников и др., 1997; 1999; Данько и др., 1999].

Согласно определению коэффициента эффективности, величина, обратная этому коэффициенту ($1/\eta$), показывает, во сколько раз нужно увеличить энергию сигнала в случае его опознавания наблюдателями к энергии сигнала при его опознавании моделью для того, чтобы получить одинаковые вероятности их правильного опознавания или обнаружения.

Коэффициент эффективности для конкретных здоровых испытуемых может говорить о функциональном состоянии зрительной системы, о ее способности распознавать объекты и принимать решения. Если применить данный подход к исследованию нарушений работы «зрительного отдела мозга», можно измерить функциональное состояние центральных отделов зрительной системы при нарушениях деятельности мозга. Кроме того, в случае здоровых наблюдателей коэффициент эффективности будет являться мерой оценки качества текста.

Для определения эффективности работы с текстами был разработан новый метод, основанный на методе сравнительных измерений (человек — компьютерная модель оптимального наблюдателя). В основу метода положено сравнение результатов распознавания одного и того же изображения объекта на фоне помехи как человеком, так и моделью наблюдателя [Красильников и др., 1997; 1999; Данько и др., 1999]. Для этого использовали некоррелированную импульсную инвертирующую помеху, которая белые пиксели изображения превращала в черные, и наоборот. В качестве меры интенсивности помехи была использована вероятность возникновения ее импульса, под которым понимаются условные пиксели, из которых собиралось изображение-стимул. Стимулом служили тексты, а контрольным элементом — разрыв в буквах, равный 5 угл. мин. При такой постановке исследований измерять следует вероятность правильного распознавания положения разрыва при заданном уровне помехи. Мы применяли четыре уровня помехи: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. При каждом уровне помехи стимул предъявляли 52 раза. При проведении измерений испытуемому ставилась задача распознать одну из четырех букв эталонных шрифтов в условиях, когда на изображение наложена помеха. При обработке экспериментальных данных коэффициент эффективности для выбранного класса изображений-текстов следует определять исходя из следующих рассуждений.

Как известно [Красильников, 1986], вероятность правильного опознавания стимульного объекта в присутствии помехи P и отношение сигнала к шуму Ψ для изображений одинаковой энергии, параметры которых полностью известны, а разности взаимно ортогональны, какими и являются использованные в опытах изображения, связаны приближенным соотношением:

$$p = \frac{1}{2}\left[1 + \Phi\left(Q_1\Psi - Q_0\right)\right],$$

где Q_1 и Q_2 — коэффициенты, зависящие от того, из какого количества изображений наблюдателю приходится делать выбор при опознавании. Интеграл вероятности (Φ) получали следующим образом:

$$\Phi\left(z\right) = \frac{2}{2\pi}\int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}}\,dx.$$

В данном случае выбор делался из четырех изображений ($Q_0 = 0{,}68$, а $Q_1 = 0{,}57$). При расчете коэффициента эффективности по известным из опытов значениям вероятности правильного опознавания изображений стимулов вначале находили соответствующие значения отношения сигнала к шуму для испытуемых и для модели по формуле:

$$\Psi = \frac{\Phi^{(-1)}(2p-1)+Q_0}{Q_0},$$

которая получена из приведенной выше, а затем по найденным значениям отношений сигнала к шуму для наблюдателей $\Psi_{набл}$ и модели $\Psi_{мод}$ по формуле:

$$\eta = \left(\frac{\Psi_{набл}}{\Psi_{мод}}\right)^2$$

вычисляли коэффициент эффективности.

Были установлена вероятность правильных ответов при чтении букв и измерена эффективность работы зрительной системы по сравнению с моделью оптимального наблюдателя. Это позволяет предсказать характер нарушения чтения в разных условиях, определить степень нарушения чтения. Для проверки данной методики работа была выполнена при предъявлении четырех букв или даже одной стилизованной буквы «С» по Ландольту в четырех ориентациях.

Эффективность работы зрительной системы была измерена в условиях помех и описана нами в рамках модели согласованной фильтрации (рис. 4.3).

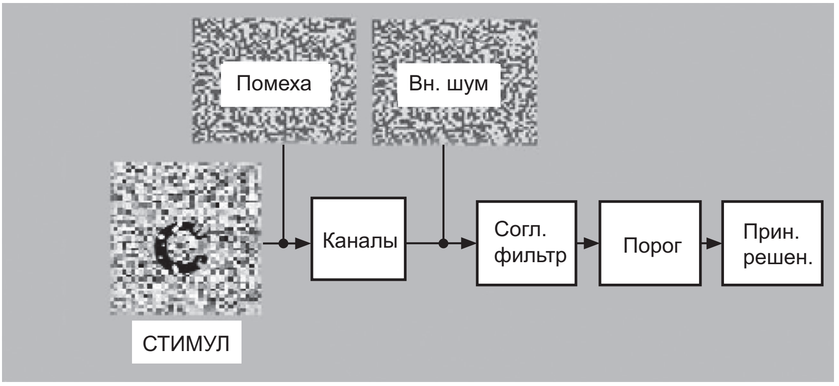


Рис. 4.3. Модель согласованной фильтрации в зрительной системе человека [Красильников, 1958; 1986; Красильников и др., 1986–2004]

Испытуемые — здоровые субъекты и пациенты с «компьютерными» неврозами. Кроме того, были разработаны методы сравнительного анализа человек-машина для оценки эффективности работы наблюдателя по сравнению с идеальным наблюдателем (рис. 4.4).

Измерения человек-машина были выполнены в соответствии с моделью согласованной фильтрации. Этот метод позволил получить количествен-

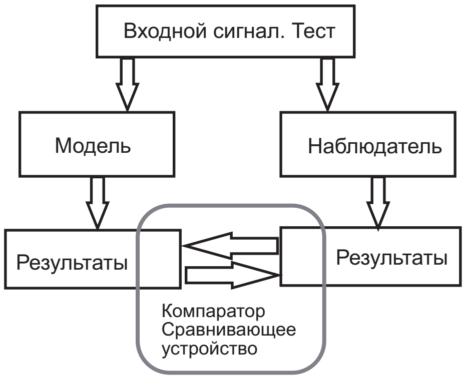


Рис. 4.4. Схематическое представление метода сравнительного измерения порогов распознавания машиной (модель, имитирующая оптимального наблюдателя, с управляемым набором исходных знаний) и человеком-оператором [Красильников и др., 1996–2004; Красильников, 2011]

ные характеристики зрительного восприятия и результаты измерения коэффициента эффективности работы зрительной системы конкретного испытуемого (рис. 4.5 и 4.6).

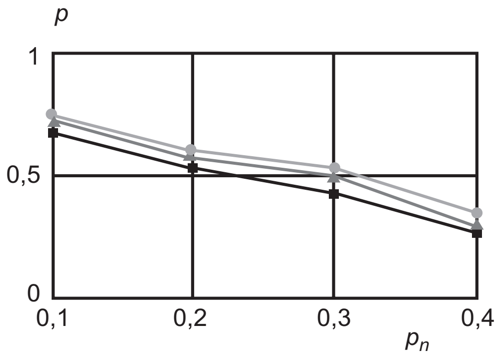


Рис. 4.5. Вероятность (*p,* ось ординат) правильного распознавания стимула в зависимости от вероятности (p_n, ось абсцисс) появления шумового импульса: верхняя линия — модели оптимального наблюдателя; средняя — здоровые люди; нижняя — пациенты с «компьютерными» неврозами при чтении текста [Данько и др., 1999]

Из рис. 4.6 видно, что коэффициент эффективности здоровых наблюдателей высок. Данную задачу исследованные нами здоровые наблюдатели решали практически так же успешно, как и оптимальный наблюдатель. Больные невротического профиля решали поставленную перед ними за-

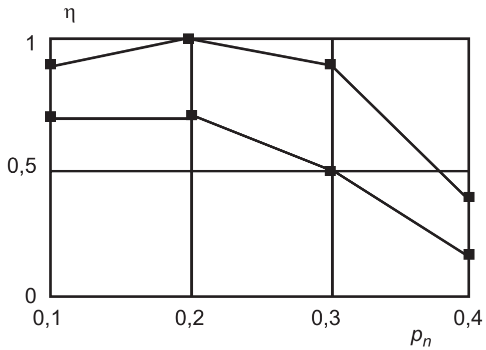


Рис. 4.6. Эффективность работы зрительной системы наблюдателя (ось ординат) в зависимости от вероятности появления шумового импульса (ось абсцисс): верхняя кривая — здоровые люди; нижняя — пациенты с «компьютерными» неврозами при чтении текста [Данько и др., 1999]

дачу значительно хуже по сравнению с оптимальным наблюдателем. Проведенные исследования продемонстрировали возможность применения модели согласованной фильтрации для оценки функционального состояния «зрительного отдела» головного мозга испытуемых, определяемого уровнем внутреннего шума. Предложенный метод измерения коэффициента эффективности удобен и дает наглядные практические результаты.

4.3. ОБЪЕКТИВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНТРАСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И УРОВНЯ ВНУТРЕННЕГО ШУМА. КЛИНИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Рассмотрена гипотеза о возрастании уровня внутреннего шума на зрительное восприятие на ранних стадиях рассеянного склероза [Муравьева и др., 2004]. Были измерены зрительные вызванные потенциалы на шахматные паттерны на однородном фоне и на фоне помехи у здоровых наблюдателей и у больных рассеянным склерозом. Изменение латентного периода и амплитуды основных компонентов зрительных вызванных потенциалов являются надежным критерием для оценки состояния пациента при рассеянном склерозе. Уровень внутреннего шума измеряли как эквивалентный. Стимулы предъявляли на фоне помехи с разным значением среднеквадратичного отклонения — СКО. Если дальнейшее приращение уровня поме-

хи не приводит к изменению отклика системы, это значение СКО помехи отождествляют с уровнем внутреннего шума [Муравьева и др., 2004].Более сорока пяти лет назад В. Н. Черниговским и Н. В. Черниговской было высказано предположение, что сложный симптомокомплекс, характерный для рассеянного склероза, определяется наличием внутреннего шума, возникающего в нейронных путях при этом заболевании [Черниговская, 1970; 2001; Черниговская, Черниговский, 1976]. Однако методические возможности тех лет не позволяли экспериментально подтвердить эту гипотезу. Современные методы измерения амплитуды и временных характеристик основных компонентов вызванных потенциалов на шахматные паттерны заданной пространственной частоты и разного контраста, предъявляемые на равномерном фоне или на фоне структурированной помехи у здоровых испытуемых и у испытуемых с ранними стадиями рассеянного склероза, позволили проверить эту гипотезу [Муравьева и др., 2004].

Стимулы предъявляли монокулярно, длительностью 500 мс. Начало предъявления каждого стимула было синхронизировано с его накоплением для усреднения. В качестве стимулов использовали реверсивный шахматный паттерн, который предъявляли либо на равномерном сером фоне, либо на фоне структурированной помехи — аддитивном широкополосном (квазибелом) шуме. Применяли шахматный паттерн 20 × 20 ячеек с размером ячейки 27,5 угл. мин. Характеристики стимула были в рамках стандартов, рекомендуемых ISCEV 1996 для исследования состояния пациентов с рассеянным склерозом, дополненные изменением контраста тестовых изображений — шахматных полей. Измеряли пространственную частоту шахматного рисунка по первой гармонике сложного спектра данного изображения. Использовали контраст шахматного паттерна б 0,02; 0,04; 0,08; 0,16; 0,32; 0,64. Помеху — стационарный гауссовый шум — предъявляли вместе с шахматным паттерном в половине случаев. Размер ячейки помехи соответствовал размеру ячейки стимула — 27,5 угл. мин. Контраст был равен 0,3. Расстояние от испытуемого до экрана составляло 1,6 м [Муравьева и др., 2004].

Проводили регистрацию вызванных потенциалов на реверсивный шахматный паттерн одной пространственной частоты (27,5 угл. мин.) разного контраста на однородном сером фоне и на фоне аддитивного шума. Частота стимуляции была выбрана 1 Гц. Вызванные потенциалы регистрировали от затылочного отведения относительно закороченного, от двух ушных электродов, референта. Использовали канал O_z, расположенный над затылочным бугром между O_1 и O_2, добавочный по схеме 10–20. Усреднение проводили на сотне реверсивных повторений стимула отдельно для каждого контраста для каждого испытуемого.

Усредненные вызванные потенциалы на каждый тип стимула, которые мы регистрировали у здоровых наблюдателей, еще усреднили по двенадцати

здоровым наблюдателям. Затем осуществили аналогичное общее усреднение всех вызванных потенциалов у больных наблюдателей [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]. Данная процедура общепринята при анализе вызванных потенциалов для группы испытуемых [Regan, 1988].

Получили усредненные по двенадцати здоровым и двенадцати больным испытуемым зрительные вызванные потенциалы на реверсивный шахматный паттерн разного контраста на однородном фоне и на фоне структурированной помехи [Муравьева и др., 2004]. В регистрируемых зрительных вызванных потенциалах выделяли четыре основных компонента: N_1, P_1 — относительно ранние, N_2, P_2 — относительно поздние. Латентные периоды данных компонентов были следующие: для N_1 — 80–100 мс, P_1 — 100–140 мс, N_2 — 140–180 мс, P_2 — 180–200 мс, что соответствует стандартам ответов на шахматный паттерн [Regan, 1988].

Зависимости латентных периодов основных компонентов вызванных потенциалов от контраста у здоровых испытуемых в ответ на шахматные паттерны, предъявляемые на однородном фоне: у здоровых испытуемых имеется достоверная зависимость уменьшения латентности с увеличением контраста, что совпадает с ранее полученными данными. Зависимость латентных периодов основных компонентов вызванных потенциалов от контраста у больных в ответ на шахматные паттерны, предъявляемые на однородном фоне, очень четкая. Видно, что у больных при всех используемых контрастах латентности основных компонентов вызванных потенциалов на шахматные паттерны больше, чем у здоровых, — это тоже хорошо известный факт [Regan, 1988]. В результате наших измерений было обнаружено достоверное отсутствие зависимости латентности от увеличения контраста у пациентов с рассеянным склерозом.

Отметим, что у больных разбросы больше, так как для усреднения брали данные по двенадцати испытуемым. Вероятно, это связано с тем, что группа здоровых испытуемых более однородна по сравнению с больными, поэтому разбросы значений латентностей в этой группе меньше (результаты см. также рис. 4.7 и 4.8).

Латентные периоды основных компонентов вызванных потенциалов на шахматные паттерны без помехи и с помехой отличаются незначительно. У здоровых испытуемых достоверное влияние помехи на значения латентных периодов можно отметить для компонентов P_1, N_2, P_2 практически при всех контрастах стимула, за исключением максимального — 0,64. Это можно объяснить тем, что при контрасте шахматного паттерна 0,64 структурированная помеха с контрастом 0,3 перестает оказывать влияние на латентности основных компонентов вызванных потенциалов (контраст помехи слишком мал по отношению к контрасту стимула). Влияние по-

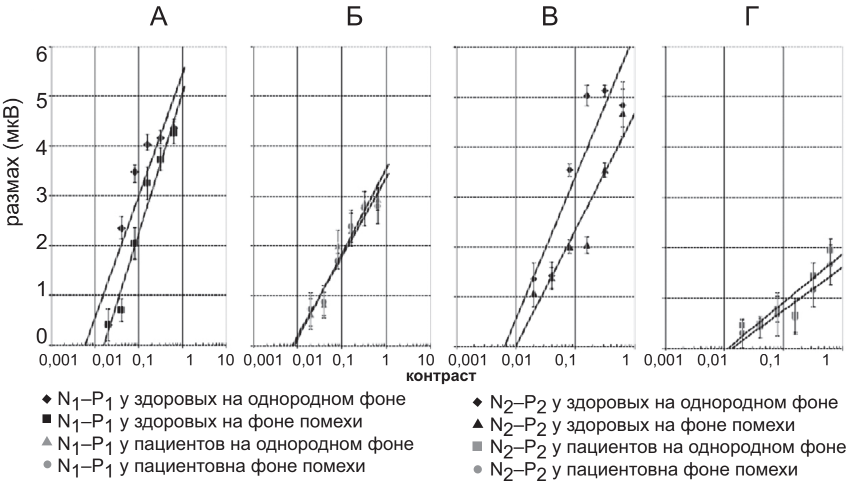


Рис. 4.7. Зависимость размаха компонентов вызванных потенциалов от контраста шахматного паттерна на однородном сером фоне и на фоне помехи у здоровых субъектов и пациентов с рассеянным склерозом: А–Б — ранние компоненты (А — размах N_1–P_1 у здоровых субъектов и Б — у пациентов); В–Г — поздние компоненты (В — размах N_2–P_2 у здоровых субъектов и Г — у пациентов) [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]

мехи на латентность компонента N_1 у здоровых наблюдателей является достоверным только при контрастах 0,04 и 0,08.

Вызванные потенциалы на шахматные паттерны на однородном фоне по сравнению с вызванными потенциалами на шахматные паттерны на фоне структурированной помехи достоверно не отличаются у больных рассеянным склерозом.

На рис. 4.7 представлены зависимости размахов (суммы амплитуд положительных и отрицательных компонентов) ранних компонентов (N_1–P_1) зрительных вызванных потенциалов от контраста у здоровых и у больных. С увеличением контраста размах ранних компонентов вызванных потенциалов увеличивается и у здоровых, и у больных испытуемых, но более выражен у здоровых [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010].

У здоровых субъектов добавление помехи с контрастом 0,3 приводит к уменьшению размаха N_1–P_1 вызванного потенциала на шахматные паттерны. Размах ранних компонентов достоверно снижается в результате добавления структурированной помехи при четырех контрастах шахматного паттерна: 0,04; 0,08; 0,16; 0,32. У пациентов достоверного снижения размахов ранних компонентов вызванных потенциалов при условии струк-

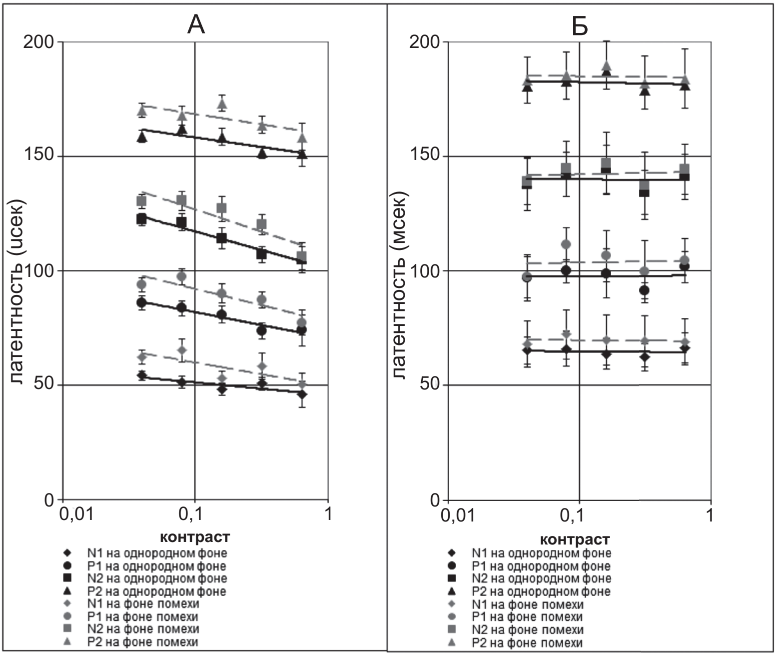


Рис. 4.8. Зависимость латентных периодов основных компонентов вызванных потенциалов от контраста шахматного паттерна на однородном фоне и на фоне помехи у здоровых субъектов — А и у пациентов, больных рассеянным склерозом, — Б. По оси абсцисс — контраст; по оси ординат — латентность, мс [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]

турированной помехи не наблюдается. Отметим, что значения размахов этих компонентов при ранних контрастах при добавлении помехи у здоровых наблюдателей совпадают со значениями размахов у пациентов без помехи. Теперь рассмотрим поздние компоненты вызванных потенциалов у здоровых испытуемых и у пациентов. С увеличением контраста размахи поздних компонентов также увеличивались. При предъявлении стимула на фоне структурированной помехи вместо однородного фона размахи достоверно уменьшаются практически при тех же самых контрастах, что и размахи ранних компонентов. У пациентов с рассеянным склерозом достоверного снижения размахов поздних компонентов не наблюдалось.

Таким образом, предъявление шахматного паттерна на фоне структурированной помехи у здоровых субъектов приводит к достоверным изменениям как показателей латентных периодов основных компонентов вызванных

потенциалов, так и размахов. У пациентов практически нет влияния этого уровня помехи на размах ранних и поздних компонентов вызванных потенциалов.

Каковы источники наблюдаемых изменений электрической активности мозга? Рассеянный склероз частое, хроническое, прогрессирующее заболевание нервной системы, предположительно иммунной природы, приводящее к образованию множественных рассеянных воспалительных очагов демиелинизации в белом веществе головного и спинного мозга. Начальные проявления рассеянного склероза — это зачастую изолированный ретробульбарный неврит, сопровождающийся зрительными и глазодвигательными расстройствами (глазные боли, усиливающиеся при движении глаз, нечеткость видения, снижение остроты зрения до сотых, наличие центральной скотомы). Ретробульбарный неврит имеет различную природу и различные последствия; в 2/3 случаях его возникновение приводит к рассеянному склерозу. Затихание острой стадии ретробульбарного неврита приводит к восстановлению остроты зрения. Ее измерение в этот период не дает возможности оценки состояния зрительных функций. Большинство больных, однако, жалуются на обеднение зрительного мира, туман, мушки перед глазами. Оказалось, что у этих больных зачастую наблюдается снижение контрастной чувствительности в области средних пространственных частот. Наличие изменений контрастной чувствительности и отсутствие изменений остроты зрения, которую измеряют при надпороговом контрасте, могут являться следствием изменения отношения сигнал/шум в зрительной системе. Изменение отношения сигнал/шум происходит в результате увеличения уровня внутреннего шума. Внутренний шум измеряли добавлением внешнего шума как эквивалентного. Добавление аддитивного внешнего шума приводит к снижению контрастной чувствительности в области средних пространственных частот. Прослеживается явная аналогия в изменении контрастной чувствительности при наблюдении здоровыми испытуемыми стимулов на фоне помехи и больными рассеянным склерозом при наблюдении стимулов без добавления помехи. Добавление помехи с небольшим контрастом к стимулу не влияло на контрастную чувствительность больных рассеянным склерозом по сравнению со здоровыми испытуемыми. Это результат того, что уровень внутреннего шума у пациентов выше, чем у здоровых испытуемых. Помеха снижает контрастную чувствительность у здоровых испытуемых и не снижает эту чувствительность у пациентов.

Стандарт контроля состояния больных рассеянным склерозом — измерение зрительных вызванных потенциалов. Измерения проводят регулярно, так как для этого заболевания характерны ремиссии. Измерение контрастной чувствительности, как показали исследования Муравьевой и со-

авторов, — наиболее чувствительный метод, а измерение этой чувствительности объективными методами делает данную методику незаменимой для клиницистов [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]. Контрастная чувствительность пропорциональна амплитуде основных компонентов вызванных потенциалов. Проведенный анализ измерений амплитудных и временных характеристик основных компонентов вызванных потенциалов на шахматные паттерны заданной пространственной частоты и разного контраста, предъявляемые на равномерном фоне или на фоне структурированной помехи у здоровых испытуемых и у испытуемых с ранними стадиями рассеянного склероза, подтверждает это утверждение. Латентные периоды основных компонентов (N_1, P_1, N_2, P_2) вызванных потенциалов на шахматные паттерны без помехи у больных больше, нежели у здоровых. Их возрастание пропорционально тяжести заболевания, что соответствует принятым в клинической практике стандартам. Амплитуды волн вызванного потенциала у больных меньше, чем у здоровых. Для оценки первой и второй волн зрительного вызванного потенциала мы измеряли их размахи (N_1–P_1, N_2–P_2). По изменению размаха первой волны (N_1–P_1) нами осуществляется расчет внутреннего шума как эквивалентного по методике, предложенной ранее [Красильников, 1986; Шелепин и др., 1999]. Для этого определяется пороговый контраст стимула при наличии помехи. Рассмотрение результатов измерений величины размаха (N_1–P_1) дает возможность провести линию тренда до пересечения с осью абсцисс. Экстраполяция линии тренда необходима, так как при малых контрастах стимула амплитуда вызванного потенциала теряется в шуме ЭЭГ.

Так, контраст применяемой нами в данной серии исследований помехи $\sigma_{\text{пом}} = 0{,}3$, пороговый контраст стимула при наличии помехи у здоровых испытуемых равен 0,015. Эту величину мы получили, экстраполируя линию тренда для данных, полученных в результате измерения вызванных потенциалов при наличии помехи. Пороговое отношение у сигнал/шум при помехе у здоровых наблюдателей:

$$\boldsymbol{\psi_{\text{при помехе}} = 0{,}015/0{,}3 = 0{,}05.}$$

В наших опытах сигнал представлял собой шахматный паттерн, состоящий из 20 × 20 ячеек; шум был представлен ячейками такого же размера, контраст которого менялся по гауссовому закону. Отклонение яркости от среднего для каждой шумовой ячейки было некоррелированным. Примем во внимание, что зрительная система осуществляет усреднение шума от площади паттерна, то есть пространственную фильтрацию наблюдаемого изображения, которая близка к согласованной фильтрации. Поэтому полученный нами результат необходимо умножить на корень квадратный из числа ячеек паттерна. В результате:

$$\psi_{\text{при помехе}} = 0{,}05 \times 20 = 1{,}0.$$

Допускаем, что пороговое отношение сигнал / шум у без помехи также равно 1,0, но ограничивающим фактором будет внутренний шум:

$$\psi_{\text{без помехи}} = 1{,}0$$

или:

$$\psi_{\text{без помехи}} = 1{,}0 = 0{,}006/\sigma,$$

где σ — контраст внутреннего шума.

Теперь рассчитаем контраст внутреннего шума:

$$\sigma = 0{,}006/1{,}0 = 0{,}006.$$

Аналогично этому мы провели расчет внутреннего шума у больных рассеянным склерозом. Пороговый контраст для обнаружения шахматного паттерна данного размера в вызванном потенциале составил 0,008. В отличие от здоровых испытуемых у больных величина порогового контраста при наличии помехи и без нее одна и та же. Пороговое отношение сигнал/шум составило 0,6. Величина внутреннего шума у больных равна 0,013. Следовательно, контраст внутреннего шума у больных рассеянным склерозом в начальных стадиях более чем в два раза выше, чем у здоровых наблюдателей. Следовательно, контраст внутреннего шума у больных рассеянным склерозом в начальных стадиях в три раза выше, чем у здоровых наблюдателей.

Каковы возможные источники внутреннего шума у больных рассеянным склерозом? Ранее было высказано предположение [Черниговская, 1970; 2001; Черниговская, Черниговский, 1976], что возрастание внутреннего шума при рассеянном склерозе возникает вследствие нарушения изолированного проведения возбуждения по миелинизированным нервным волокнам и появления эфаптической передачи импульса между аксонами. Возрастание уровня внутреннего шума может быть связано не только с переходом возбуждения с одного аксона на другой, вероятнее всего, в основе возникновения внутреннего шума при рассеянном склерозе возможны нарушения проводимости в демиелинизированных аксонах: снижение скорости проведения импульса, нарушения характера, частоты и ритмичности проведения потенциалов действия. Именно поэтому у пациентов всегда отмечают увеличение латентных периодов основных компонентов вызванных потенциалов. Разная степень повреждения миелина и разное время проведения нервного импульса приводят к тому, что общий порядок следования импульсов в зрительных путях изменяется. Происходит выпадение синхронности прохождения потенциала действия — временная дисперсия [Waxman, 1982]. Лишь в бляшках с высокой плотностью демиелинизированных аксонов и малым количеством или отсутствием глиальных элемен-

тов, может быть, могут развиваться такие экзотические нарушения проводимости, как перенос импульса с одного волокна на другое [Черниговская, 1970; 2001; Черниговская, Черниговский, 1976; Waxman, 1982]. Известно, что латентные периоды ответов нейронов связаны с порогами их реакций на свет — световой порог и латентность реакции ганглиозной сетчатки прямо связаны между собой. У нейронов с относительно высокими порогами реакций на свет (низкой чувствительностью) латентные периоды реакций, как правило, более длительные [Шевелев, 1971]. Это означает, что у больных рассеянным склерозом могут поражаться на ранних стадиях нейроны определенных групп, каналов зрительной системы с разными морфофункциональными характеристиками, но это уже отдельная тема.

Однако независимо от того, каковы источники внутреннего шума, следует отметить, что все, нарушающее заданный приход сигнала к следующему уровню зрительной системы, приводит к возникновению случайных импульсных потоков и к возрастанию уровня внутреннего шума.

Обратим внимание на то, что как измерение остроты зрения объективным способом, так и измерение контрастной чувствительности объективным способом не зависят от воли испытуемого. Это действительно объективные показатели, и эти методы могут быть применены для измерения любых неуправляемых волей показателей, в том числе для измерения неосознаваемых процессов.

ГЛАВА 5

КАНАЛЫ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

5.1. ПРОВОДЯЩИЕ ПУТИ, «ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ», ОТ СЕТЧАТКИ К ПОДКОРКОВЫМ ЯДРАМ И ЗРИТЕЛЬНОЙ КОРЕ

Формирование изображения на сетчатке — это основной переход от оптического к нейронному описанию. Ключевой численной характеристикой на первом этапе является функция рассеяния оптики глаза. В сетчатке происходит поглощение квантов, кодирование числа поглощенных квантов и адаптация к среднему уровню яркости. Описание изображения в этом слое можно охарактеризовать как экранное отображение его в виде распределения возбуждений, соответствующего распределению освещенности. В сетчатке глаза, в фоторецепторах (120 000 000 палочек и 6 400 000 колбочек) происходит процесс поглощения фотона и запуска отклика нейронных структур. Затем от промежуточных слоев сетчатки — из биполярных клеток — аналоговый электрический сигнал передается на ганглиозные клетки сетчатки. Ганглиозные клетки — это первые по мере обработки информации в зрительной системе нейроны, которые генерируют распространяющиеся импульсы. Это «выходные» нейроны сетчатки, их аксоны образуют зрительный нерв. Число аксонов в зрительном нерве у человека колеблется от 800 000 до 1 200 000. Ганглиозные клетки сетчатки могут быть разных размеров, у них соответственно большие и маленькие

дендритные поля, тела клеток и диаметры аксонов. Аксоны ганглиозных клеток направляются в подкорковые зрительные центры. Основное количество аксонов ганглиозных клеток связывают сетчатку и наружное коленчатое тело (НКТ). Тонкие аксоны от мелких ганглиозных клеток направляются в слои НКТ, в которых тоже расположены мелкие клетки. Примем среднее число клеток НКТ равным 1 210 000 ± 13 700. Из них число крупных всего 111 000 ± 3 150, а мелкие составляют основную массу — 1 099 000 ± 134 000.

Из подкорковых ядер информация направляется в первичную зрительную кору (Brodmann area 17, BA17). Ее площадь у человека равна 2613 мм^2, что составляет 365 % площади сетчатки, то есть в 3,65 раза больше площади сетчатки, равной всего 715 мм^2, от одной до семи колбочек в фовеа на две ганглиозные клетки и на периферии до ста на одну ганглиозную клетку или одно волокно. Количество нейронов в НКТ приблизительно равно числу волокон в зрительном нерве и составляет около 1 000 000, а количество нейронов в BA17 составляет 538 000 000. Если в сетчатке плотность рецепторов и ганглиозных клеток неоднородна, она уменьшается от фовеа к периферии, то в первичной проекционной коре (BA17) распределение плотности нейронов практически одинаково. Так как число волокон, идущих от центра сетчатки из фовеа, велико, из периферии сетчатки — мало, поверхность коры, в которую проецируется фовеальная область, велико, а периферии — мало. Это так называемый фактор магнификации представительства в коре центра поля зрения. Важно то, что наибольшее число мелких ганглиозных клеток сетчатки представлены в ее центре. Поэтому и в первичной зрительной коре основное представительство центра поля зрения — это представительство мелких клеток. Остроту зрения определяют именно мелкие клетки. Активность этих клеток косвенно можно оценить по электрофизиологическим измерениям в определенной части затылочной области.

Рецептивные поля нейронов ганглиозных клеток сетчатки у кошек, приматов имеют почти круглую форму с концентрическим расположением антагонистических зон [См. обзоры: Глезер, Цуккерман, 1961; Подвигин и др., 1986, Шевелев, 1984]. Рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки и нейронов НКТ имеют четко выраженную центральную часть и антагонистическую периферию. Все нейроны с концентрическими рецептивными полями разделяются на две большие группы: одни активируются при освещении центра их рецептивного поля — *on*-нейроны, а другие активируются при затемнении центра — *off*-нейроны. *On*- и *off*-нейроны представляют собой взаимодополняющие системы, реагирующие соответственно на светлые и темные объекты. Это первый уровень оппонентных нейронов к яркости, они реагируют на свет и тьму [Kuffler, 1953]. Периферия этих зон име-

ет противоположные свойства; так, если центр поля активируется на включение света, то периферия — на выключение (*on*-центр и *off*-периферия), а если центр — на выключение, то периферия — на включение (*off*-центр и *on*-периферия). Рецептивные поля ночного зрения и ряд других систем почти не имеют тормозной периферии. Это надо учитывать при исследовании сигналов, идущих от сетчатки в другие подкорковые ядра. Кроме наружного коленчатого тела ганглиозные клетки сетчатки направляют свои аксоны в пульвинар, супрахиазмальное ядро, верхние бугры четверохолмия и др. Ганглиозные клетки, нейроны наружного коленчатого тела других подкорковых ядер и разных областей зрительной коры представляют собой взаимосвязанные упорядоченные сети.

Укажем на некоторые свойства основных, имеющих выраженные отличия нейронных систем (каналов). Первый основной по числу проводников путь идет от сетчатки по зрительному нерву через хиазму и латеральное коленчатое ядро к первичной зрительной коре ВА17 и лишь затем — в «ассоциативные» зоны коры. Этот путь делится на два — крупноклеточный и мелкоклеточный. Первый начинается от разных клеток сетчатки через разные слои НКТ и в разные образования ВА17, а оттуда переходит в дорзальный и вентральный пути. Второй путь принципиально другой; также начинается от ганглиозных клеток сетчатки (но этих клеток еще меньше, чем крупноклеточных, идущих в НКТ), и аксоны этих ганглиозных клеток направляются через верхние бугры четверохолмия (SC) и через подушку (P), но не к первичным, а сразу к «ассоциативным» областям коры. Есть еще путь от ганглиозных клеток сетчатки к супрахиазмальному ядру, регулирующий суточный ритм.

Наиболее детально изучен первый путь из НКТ в ВА17 [См. обзор: Подвигин и др., 1986]. Анатомически и функционально выделены с наиболее различными характеристиками две группы ганглиозных клеток. Большие и маленькие клетки парасоль и миджет, коротколатентные и длиннолатентные нейроны. Начинающиеся от клеток сетчатки парасоль и миджет связаны с соответствующими по размеру магно- и парвоклетками НКТ, затем из упорядоченных слоев НКТ пути идут до упорядоченных и вполне определенных структур первичной зрительной коры. Следует отметить, что разделение на тонический и фазический тип нейронов справедливо для одних и тех же средних фотопических условий стимуляции. Варьируя уровень световой фоновой адаптации и яркости стимула, можно получить менее выраженные различия между тоническим и фазическими нейронами.

На уровне НКТ помимо аналогичных нейронов с концентрической структурой существуют также нейроны с более сложной пространственной организацией рецептивных полей; например, фрагментарность тормозных участков на периферии рецептивного поля, наличие в поле не

одного, а двух-трех максимумов возбуждения и другие признаки гетерогенной структуры зон возбуждения и торможения, некоторая ориентационная и дирекциональная чувствительность [Новиков и др., 1981; Подвигин и др., 1986; Цуккерман, 1978; Подвигин и др., 1986; Якимова, Чижов, 2015]. Для НКТ характерна строгая ретинотопическая организация. Горизонтальное взаимодействие нейронов наружного коленчатого тела выражено слабо. Известны тормозные связи между нейронами, получающими информацию от разных глаз.

В исследованиях Хьюбела и Визела было впервые показано [Hubel, Wiesel, 1959], что клетки зрительной коры избирательны к ориентации вспыхивающей или движущейся тестовой полосы. Хьюбел и Визел показали, что такая чувствительность нейронов обусловлена особенностями пространственной организации рецептивных полей клеток зрительной коры. Рецептивное поле корковых нейронов состоит из двух или большего числа чередующихся возбуждающих и тормозных зон вытянутой формы. Такие нейроны реагируют на тестовые полосы, совпадающие по направлению с возбуждающими зонами их рецептивных полей, либо на малые тестовые пятна, но они не чувствительны к диффузному освещению их рецептивных полей. Хьюбел и Визел [Hubel, Wiesel, 1962] предложили делить рецептивные поля на простые, сложные и сверхсложные.

Нейроны с разной сложностью рецептивных полей, но настроенные на выделение определенной ориентации в двумерном пространственно-частотном спектре стимула образуют вполне определенные корковые структуры, колонки в диаметре около 100 мкм. Нейроны, расположенные по соседству с данной группой нейронов, с данной колонкой, образуют другую «колонку» с избирательностью к иной ориентации стимула. Несколько колонок, в которых представлены нейроны, избирательные ко всем ориентациям, образуют элементарный модуль, так называемую гиперколонку, предназначенную для полной обработки двумерного пространственно-частотного спектра изображения на своем участке поля зрения [Глезер, 1985; 1995; Глезер и др., 1975]. Горизонтальные связи между однородными колонками с одной ориентационной избирательностью обеспечивают сшивание отдельных фрагментов изображений, в единое целое [Field, 1987; 1993; 1994; 1999]. Горизонтальные связи между разнородными колонками, с разной ориентационной избирательностью обеспечивают фрагментацию сцены и выделение объекта из фона [Шелепин, 1981; 1984].

Теперь мы знаем, что клетки первичной зрительной коры потому избирательны к ориентации полос и краев, их длине, ширине полос, а зрительная кора представляет высокоупорядоченную структуру, что подобная организация облегчает выделение определенных статистических связей в изображении и улучшает отношение сигнал/шум в условиях неопределенности.

5.2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЕ КАНАЛЫ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Информационные каналы от сетчатки до первичной зрительной коры BA17 неоднородны по своим функциональным характеристикам. Они выделяют разные пространственные, временные, цветовые и, главное, статистические характеристики окружающего мира. В середине XX века одним из наиболее распространенных инструментов для описания аналоговых сигналов и их преобразования был спектральный анализ [Харкевич, 1953]. В исследовании сенсорных систем спектральный подход имел долгую историю. В зрении, несмотря на первые шаги и модели, сделанные Э. Махом до начала телевизионной эры [Зворыкин, 1933], практически не было сделано ничего. Только О. Шаде измерил пространственно-частотные характеристики, а де Ланге — временные частотные характеристики [Schade, 1956; de Lange, 1958]. Шаде и де Ланге рассматривали частотные характеристики зрительной системы как одноканальной, хотя и говорили о системе «фовеа — кора». В основе этих работ — общеизвестный метод динамического исследования любой линейной системы. Применительно к зрению синусоидально модулированный во времени свет показал динамическую природу восприятия в системе «фовеа — кора». Де Ланге установил характеристики затухания мельканий от их частоты путем сравнения амплитуды выходного сигнала по амплитуде входного сигнала по частоте при постоянной средней яркости. Этот способ исследования был вначале применен к изучению восприятия белого света, затем цветного. Была развита фликкер-фотометрия.

Интеллектуальный рывок был сделан в Кембридже Фергюсом Кемпбеллом и исследователями, входившими в его команду. Они установили, что разные типы рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки, клеток НКТ и клеток коры образуют нейронные сети, каналы зрительной системы, настроенные на различные пространственные частоты, на разную скорость движения стимулов на стимулы, разную частоту мельканий. Ф. Кемпбелл начал свои исследования контрастной чувствительности еще в 1962 году, и впоследствии они получили широкую известность. Стимулами в его экспериментах служили синусоидальные и прямоугольные решетки с различными контрастом и пространственной частотой. Стимулы предъявляли на экране электронно-лучевой трубки и замеряли пороговый контраст для синусоидальных и прямоугольных решеток разной пространственной частоты [Campbell, Robson, 1968]. Пороговые контрасты измеряли методом варьирования глубины модуляции (контраста) решетки от максимального до значения, при котором она становилась полностью невидимой для наблюдателя, и наоборот, от минимального, нулевого контраста до порогового. В резуль-

тате измерений Кемпбелл и Робсон получили частотно-контрастную характеристику, которая имела максимум в области средних пространственных частот, как и в опытах О. Шаде и де Ланге.

На высоких и низких пространственных частотах контрастная чувствительность падает. Чувствительность в области высоких пространственных частот ограничена оптикой глаза человека, в области низких — функциональными особенностями передачи сигнала в ретино-геникулостриарном пути. Кемпбелл и Робсон сравнили контрастную чувствительность на прямоугольные решетки и на синусоидальные и смогли установить, что чувствительность на прямоугольную решетку выше, что связано с ее сложным спектром. Контраст первой гармоники выше, чем контраст, определяемый по меандру, то есть по профилю периодической прямоугольной решетки со скважностью, равной 2. Третья и следующие гармоники не позволяли получить резкое снижение контрастной чувствительности к прямоугольным решеткам на низких пространственных частотах. Они попадали в область максимальной чувствительности. И наоборот, прямоугольные решетки с высокими пространственными частотами мало отличались от синусоидальных, так как высокие гармоники их пространственно-частотного спектра попадали в область уже невоспринимаемых частот. Выделение пространственно-частотных составляющих спектра происходит, по мнению Кемпбелла и Робсона, в пространственно-частотных каналах. Они предположили наличие большого числа параллельных каналов в зрительной системе [Campbell, Robson, 1968].

На рис. 5.1 представлена схема каналов, идущих от сетчатки к зрительной коре. Толщина стрел имитирует различия в толщине аксонов разных типов ганглиозных клеток сетчатки и наружного коленчатого тела. Разреженные рецептивные поля представлены разными размерами. Размеры рецептивных полей не упорядочены в соответствии с ретинотопической организацией. Такое наложение мелких рецептивных полей на разные участки портрета характерно для условия свободного просмотра рисунка.

Таким образом, контрастная чувствительность к прямоугольным решеткам превышает чувствительность к синусоидальным, так как амплитуда первой гармоники в спектре прямоугольной решетки выше амплитуды самой прямоугольной решетки. Именно этот факт подтвердил способность зрительной системы реагировать на отдельные компоненты спектра изображения [Campbell, Robson, 1968]. Тем самым через сто лет догадка Эрнста Маха о применимости Фурье-анализа к исследованию зрительной системы получила убедительное экспериментальное обоснование. На рис. 5.2 представлена решетка, меняющаяся по логарифму пространственной частоты слева направо и по логарифму контраста снизу вверх. Внутри показана чувствительность отдельных каналов, настроенных на

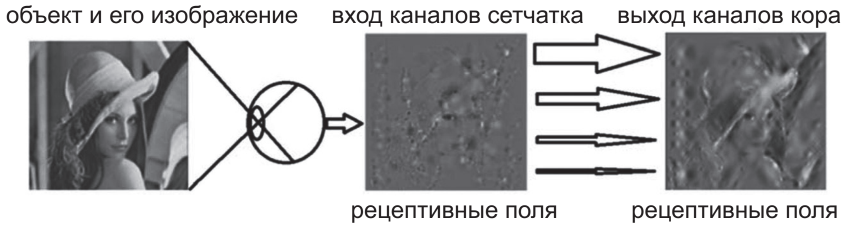


Рис. 5.1. Схема, иллюстрирующая пространственно-частотные каналы и обострение ориентационной чувствительности на уровне ВА17. Размеры рецептивных полей не упорядочены в соответствии с ретинотопической организацией

разные частоты, слева — низкие и справа — высокие. Ширина каналов показана условно и должна составлять около 1,5 октавы. Общая огибающая указывает кривую контрастной чувствительности к видимой полосе пространственных частот с пиком в условиях фотопического (дневного) освещения 4 цикл/угл. град.

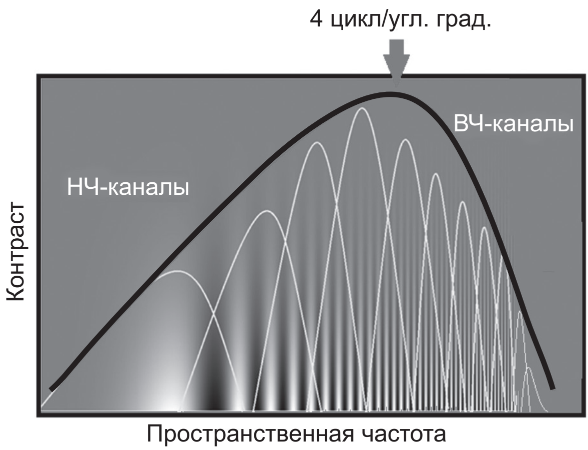


Рис. 5.2. Переменная пространственная частота с переменный контрастом и схема чувствительности всей зрительной системы и отдельных пространственно-частотных каналов

На рис. 5.2 для каждого из каналов показана их чувствительность как величина, обратная контрасту. Аналогично представлена чувствительность и всей зрительной системы. В дальнейшем существование пространственно-частотных каналов в зрительной системе было подтверждено исследованиями адаптации к решеткам с заданной пространственной частотой и

ориентацией [Blakmore, Campbell, 1969]. Так, при рассматривании в течение продолжительного времени решетки определенной пространственной частоты с высоким контрастом чувствительность зрительной системы к этой пространственной частоте снижается. При этом затрагиваются не только частота, вызывающая адаптацию, но и соседние пространственные частоты. Ширина полосы частот, в пределах которой происходит адаптация, составляет 1,5 октавы, что и является, согласно модели Кемпбелла и Робсона, шириной пространственно-частотного канала.

Фергюс Кемпбел и его коллеги на основании измеренных ими пространственных и временных характеристик назвали эти проводящие нейронные пути пространственно-частотными каналами зрительной системы. Этот термин получил широчайшее распространение. В данной книге мы будем рассматривать два типа каналов, настроенных на разные пространственные частоты, низкие и высокие. Эти два типа каналов настроены и на разные временные частоты. Выделение только двух каналов очень условное, так как по параметрам пространственная и временная полосы пропускания могут подходить под разные типы рецептивных полей системы «сетчатка — мозг». На самом деле и у каналов, и у рецептивных полей нейронов разных уровней зрительной системы имеется целый ряд еще и других свойств, которые надо подробно описывать. Это линейные и нелинейные свойства, разная чувствительность к цветовым сигналам, к размерам входных изображений и т. д. Существуют попытки отождествить каналы с рецептивными полями крупных клеток (магно) и клеток мелких (парво). У них есть много общих черт. Но есть и различия.

Сейчас ясно, что рецептивные поля первичной зрительной коры ВА17 являются двумерными фильтрами пространственных частот. Вначале предполагали, что в основе всех процессов — локальный Фурье-анализ [Глезер, 1978; Глезер, и др., 1975; Campbell, 1968; 1974; 1980; Campbell et al., 1965; 1966; 1968; 1969; 1970]. Базисом для гипотез Ф. Кемпбелла и В. Глезера послужила гипотеза Э. Маха, впервые высказавшего предположение, что входное изображение преобразуется в некий код, напоминающий Фурье-анализ. Гельмгольц считал, что Фурье-анализ справедлив для слуха, но не для зрительной системы. Позднее оказалось, что на самом деле и в слухе, и в зрении все похоже, но не совсем так. В зрительной системе рецептивные поля осуществляют обработку изображений, напоминающую обработку с помощью двумерных элементов Габора, и в частности напоминают discrete cosine transform (DCT), тем самым обеспечивая сжатие информации, которое послужило основой для создания алгоритмов международного Still Image Compression Standard JPEG (Joint Photographic Experts Group). Удобным оказался алгоритм, разработанный В. Бабкиным в Космическом институте в Москве [Babkin, 1991; 1993]. Стандарт JPEG оказался одним из первых

ярких примеров сжатия изображений с помощью нейроморфных методов, доступных теперь каждому пользователю на планете. Тысячи людей создавали само программное обеспечение. Общие физиологические закономерности, определившие создание стандарта JPEG, при желании можно найти в работах Ф. Кемпбела и его коллег в Кембридже и В. Д. Глезера с сотрудниками в Ленинграде [Blackemore, Cambell, 1969; Campbell, Robson, 1968; Campbell et al., 1969; Campbell, 1970; Ginsburg,1972; Глезер и др., 1973; 1975; Глезер, 1985; Подвигин и др., 1986; Бондарко и др., 1999; Шелепин, 1973; 1981; Шелепин и др., 1985]. Идеи пространственно-частотной фильтрации давно использовались в области сжатия телевизионного сигнала [Цуккерман, 1964]. Сейчас разработаны значительно более эффективные методы сжатия видеосигнала [Луцив, 2011].

Представления о решетках Габора как оптимальном визуальном сигнале в сенсорной физиологии были предложены Кожевниковым и Мещерским в физиологии слуха, а Ватсоном и Барлоу — в физиологии зрения [Кожевников, Мещерский, 1963; Watson et al., 1983]. Решетки Габора служат и моделью, имитирующей свойства рецептивных полей зрительной коры, и оптимальными стимулами для их исследования.

Синтезированные решетки Габора позволяют измерить полосу пропускания рецептивных полей разных уровней зрительной системы. То, что они вытянутые, совсем не означает, что элементы Габора стимулируют только продолговатые рецептивные поля зрительной коры, которые имеют аналогичную форму. Это не означает, однако, что предыдущие уровни не будут активированы, но их активация будет существенно другой. Применение решеток Габора означает, что с помощью этих стимулов мы можем установить двумерную пространственно-частотную характеристику рецептивного поля в заданных условиях наблюдения.

Следует отметить, что область применения синусоидальных решеток не ограничивается только оценкой полос частот, передаваемых тем или иным рецептивным полем. Основанные на их применении пространственно-частотные методы являются эффективным инструментом для исследования характеристик визуальных сцен, оптических и телевизионных систем, различных уровней зрительного анализатора. Пространственно-частотные методы исследования расширяют наши возможности в познании и дают численные характеристики для проектирования искусственных распознающих систем и систем визуализации данных. Измерение двумерных пространственно-частотных свойств первичной зрительной коры позволяет установить закономерности связей между элементами изображения. Элементы, имеющие одну ориентацию, то есть с одинаковыми свойствами, в разных участках поля зрения на определенном расстоянии могут усиливать активность друг друга [Field, 1987—1994] и тормозить противо-

положные ортогональные ориентации, взаимно оппонентные элементы, а именно рецептивные поля с оппонентными свойствами [Шелепин, 1991]. Напомним, что для восприятия формы черно-белых изображений существуют два главных оппонентных механизма. Первый обеспечивает оппонентное описание рецептивными полями сетчатки появления тьмы (off) и света (on) в изображении [Barlow, 1953; Kuffler, 1953]. Второй обеспечивает описание формы — это ориентационно оппонентные механизмы зрительной коры. Это было показано в психофизических исследованиях [Blakemore et al., 1970] и затем доказано в нейрофизиологических исследованиях [Шелепин, 1973; 1981; 1984; Morgan et al., 2000]. Результаты нейрофизиологических исследований представлены на рис. 5.3.

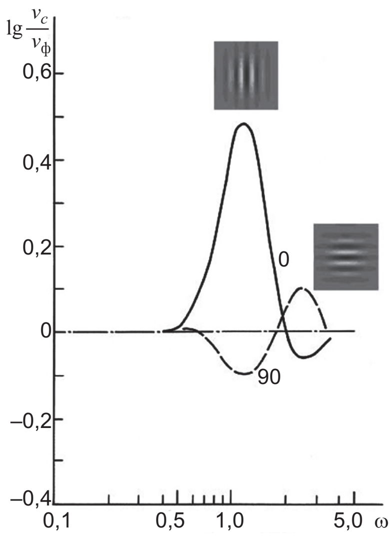


Рис. 5.3. Отклики нейрона зрительной коры на решетки ортогональной ориентации и разной пространственной частоты [Шелепин, 1981–1984]

Из рис. 5.3 видно, что изменение по оси абсцисс пространственной частоты тестовой решетки одной ориентации, вертикальной, принятой за нуль, приводит к изменению частоты импульсации нейрона по отношению к импульсации в покое. Если мы изменим ориентацию тестовой решетки на 90 угл. град., закономерность изменения частоты импульсации будет полностью противоположна ортогональной ориентации 0 угл. град.

Нейрофизиологические исследования трудоемки, и их не увидеть непосредственно при чтении книги, поскольку необходима работа в нейрофизиологической лаборатории, но психофизические исследования доступны для наблюдения везде. Фиксация взора на одном рисунке, например левом (рис. 5.4), в течение трех минут, а затем перевод взора на другой вызовут активное взаимодействие оппонентных нейронных сетей — наблюдатель увидит взаимодействие двух изображений. На рисунке представлены решетки Габора, оптимальный стимул и наиболее близкая модель рецептивных полей зрительной коры.

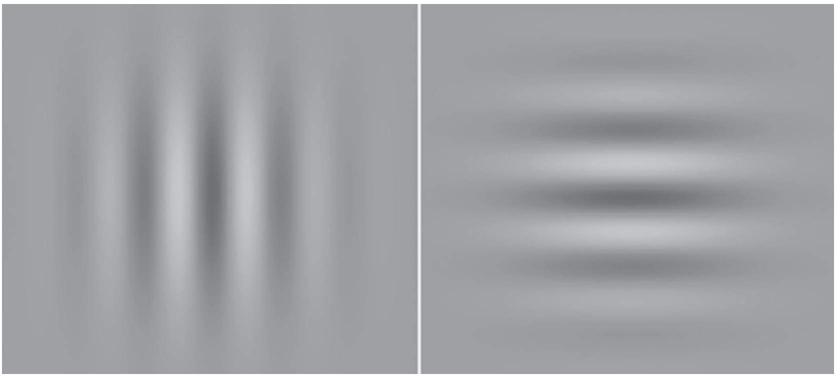


Рис. 5.4. Две взаимно перпендикулярные решетки Габора

Таким образом, мы продемонстрировали результаты нейрофизиологических исследований пространственно-частотных каналов и их оппонентное взаимодействие.

Помимо пространственно-частотных характеристик каналов важное значение имеют их временные характеристики.

На рис. 5.5 слева показано множество каналов, которые условно можно свести к двум типам — они изображены в окне «пространственные фильтры». Это высокочастотные и низкочастотные каналы. Их отождествляют с клетками проводящих путей разного размера.

Крупные ганглиозные клетки (парасоль), крупные клетки наружного коленчатого тела образуют взаимосвязанные сети, как мы уже говорили, — каналы. Эти каналы называют магно. Мелкие клетки разных уровней образуют сети — каналы, называемые парво.

После обработки в первичной зрительной коре магно- и парвосистемы передают различную информацию о наблюдаемой сцене различным областям мозга для дальнейшего анализа. При этом парвоцеллюлярный тракт,

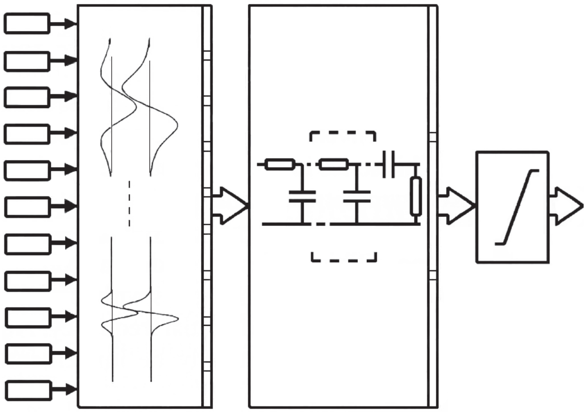


Рис. 5.5. «Каноническая» многоканальная по пространственно-частотной фильтрации модель с одним-тремя временными фильтрами и одним пороговым устройством [Куликовский, Робсон, 1999]

который условно называют вентральным трактом, идет из поля ВА17 (VI) в поле ВА18 (V2), оттуда в ВА19 (V3), затем в ВА19, ВА37 (V4), в нижнее височное поле, хранилище описаний изображений инвариантных к масштабным преобразованиям объектов. Информация, поступающая по этому пути, обеспечивает возможность распознавания объектов.

Магноцеллюлярный тракт, в свою очередь, условно называют задним дорзальным трактом, поскольку из затылочной коры он направляется к теменной коре. Основной функцией этого пути является анализ характера динамических изменений и положения в пространстве зрительного объекта, локализации объекта в поле. Для магноцеллюлярного пути характерен кратковременный быстрый ответ. Данный путь чувствителен к низким пространственным частотам, он способен обнаружить низкие уровни контраста и чувствителен к высоким временным частотам, имеет высокое временное разрешение. Магносистема обрабатывает информацию о движении, о грубых пространственных признаках, важных для ориентации в пространстве [Previc, 1987: Livingston, Hubel, 1988; Kulikowski, Vidyasagar, 1990]. Максимальный ответ магносистемы наблюдается при предъявлении стимулов в диапазоне низких пространственных частот порядка 0,1–4,0 цикл/угл. град. и высоких временных частот от 8 до 40 Гц и выше. Активность же парвосистемы проявляется при предъявлении изображений, содержащих высокие пространственные частоты от 4,0 до 24,0 цикл/угл. град. и низкие временные 0,5–1,5 Гц, но возможна активность данной

системы при частотах мелькания до 8 Гц [Kulikowski, Tolhurst, 1973; Previc, 1987; Kulikowski, Vidyasagar, 1990; Regan, 2000].

Основные две крупномасштабные нейронные сети, называемые еще дорзальный и вентральный пути, показаны на рис. 5.6. Активность этих нейронных сетей можно видеть при выполнении испытуемым различных целенаправленных действий с различной постановкой задачи.

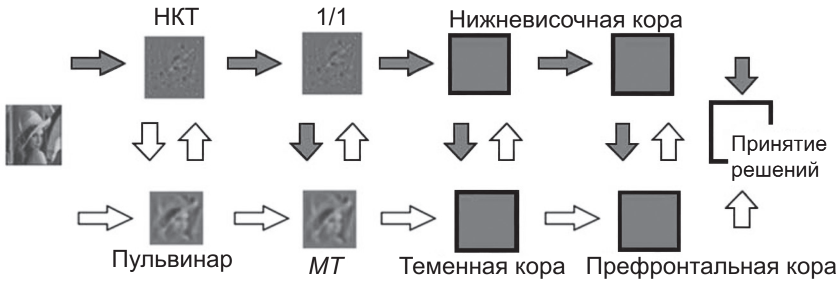


Рис. 5.6. Низкочастотный и высокочастотный каналы передачи информации от сетчатки до префронтальной коры

Активность в этих крупномасштабных сетях от входных рецепторов до фронтальной коры, принятие решений и планирование действий, управляется внутренним формированием цели или постановкой цели. Важную роль играет избирательное внимание, которое переключает активность в том или ином канале. Между каналами идет «борьба» за выход на «центр принятия решений». В канале высокочастотном больше информации, больше элементов, обрабатывающих информацию, он позволяет увидеть изменение ситуации на большем расстоянии, а это важнейшее преимущество человека по сравнению с большинством хищников. Поэтому основное внимание сосредоточено на высокочастотном канале. Однако, например, в большинстве игр, в случаях ближнего боя, удержания транспортного средства в потоке, при посадке самолета в ручном режиме и т. д. важно переключение на низкие пространственные частоты. А чтение — это постоянный процесс взаимодействия низкочастотного и высокочастотного каналов, но к вопросам чтения мы еще вернемся.

Надо указать, что выход каналов зрительной системы идет на согласованные фильтры; по существу, это описания объектов в обучаемых нейронных сетях. Их реализация может быть самой разнообразной. Важно получить сигнал рассогласования из памяти и описания, поступившего по первичным каналам зрительной системы. Общая схема деятельности зрительной системы представлена на рис. 5.7. Даны ее вариант, учитывающий обучение и избирательное внимание, и сигнал на организацию дви-

гательного отклика. Представим примеры влияния избирательного внимания на выбор канала, проявления интереса наблюдателя к использованию описания наблюдаемой сцены, даваемое работой определенного пространственно-частотного канала.

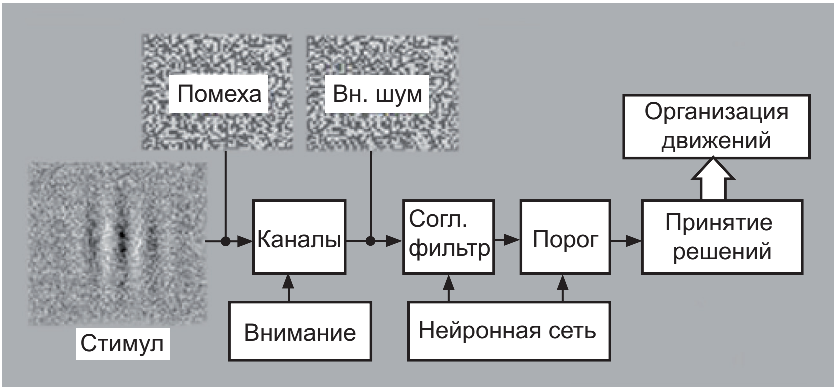


Рис. 5.7. Схема согласованной фильтрации в зрительной системе [Красильников, 1958; 1986; 2011] с учетом обучаемой нейронной сети, избирательного внимания и сигнала для организации двигательного отклика

Рабочий диапазон определяется настройкой наблюдателя, неким механизмом избирательного внимания, для выбора интересного участка в пределах видимого диапазона контрастной чувствительности. Напомним, что при вождении автомобиля нам надо активировать высокочастотный канал при рассматривании дорожных указателей и низкочастотный канал для сохранения безопасного движения в потоке. Возможность активации того или иного участка видимого пространственно-частотного диапазона может происходить не только в экстремальных ситуациях, но и в условиях любой деятельности человека. Аналогичная дифференциация характерна и в творческом процессе.

Рассмотрим два вида изобразительного искусства — живопись и графику. Полотна в духе импрессионизма активируют преимущественно механизмы низкочастотного описания, целостного восприятия, а графические работы преимущественно активируют механизмы высокочастотной фильтрации, локального восприятия. Термин impression — впечатление (лат.) отражает глобальное восприятие изображения. Повышенная эмоциональная и малая информационная насыщенность такого типа живописи не требует детального рассматривания. Восприятию графических работ, напротив, присуще длительное рассматривание. Обилие деталей

и необходимость выделения высоких пространственных частот требуют многократного перевода взора в различные участки изображения. Имеется, правда, множество переходных приемов в изобразительном искусстве, но крайние формы его позволяют продемонстрировать возможность переключения избирательного внимания для включения механизма локального или глобального описания.

Для нас эти примеры важны как избирательное использование информации, подаваемой по одному из каналов. Это демонстрирует, как избирательное обращение к информации из одного типа каналов влияет на поведение; заметим, одного типа — деление на два типа является условным, но весьма плодотворным в методическом и дидактическом планах.

5.3. ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ ПОРАЖЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим исследования зрительной системы человека с учетом патофизиологических отклонений с целью выявления особенностей передачи информации в многоканальной зрительной системе.

Многоканальная модель зрительной системы Фергюса Кемпбелла определила целое направление в нейроофтальмологии. Но на первом этапе был важен пространственно-частотный подход, измерения контрастной чувствительности к оценке функционального состояния зрительной системы [Макашова, 1981; Пивоваров, 1982; Шелепин и др., 1981; 1982; 1985; Ginsburg, 1972; 1978; 1983]. Исследования избирательного поражения каналов начались позднее [Шелепин и др., 1985]. С. В. Муравьева с соавторами у двенадцати здоровых наблюдателей и у шестидесяти пациентов с рассеянным склерозом измерили контрастную чувствительность и построили пространственно-частотные характеристики в ответ на предъявление решеток Габора на однородном фоне [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010].

На рис. 5.8 показана зависимость контрастной чувствительности от пространственной частоты стимула у здоровых наблюдателей и у пациентов с рассеянным склерозом. В результате анализа данных мы выделили три группы испытуемых с рассеянным склерозом.

В группу А были включены пациенты с рассеянным склерозом с доминирующим снижением контрастной чувствительности в области высоких пространственных частот (5,5–12 цикл/угл. град.); на рис. 5.8 кривая обозначена пунктирной линией с метками в виде треугольников. В эту группу вошли семнадцать пациентов.

В группу Б включены пациенты с рассеянным склерозом с преимущественным снижением контрастной чувствительности в области низких и средних пространственных частот (0,3–5,5 цикл/угл. град.); кривая обозначена серой пунктирной линией с метками в виде квадратов. Девятнадцать пациентов.

В группе В — пациенты с рассеянным склерозом с равномерным снижением контрастной чувствительности во всем диапазоне пространственных частот (0,3–12 цикл/угл. град.); кривая обозначена сплошной линией с метками в виде кружков. Двадцать четыре пациента.

Группа В — пациенты со снижением контрастной чувствительности во всем диапазоне пространственных частот. Это пациенты в тяжелом состоянии, с быстрым течением рассеянного склероза.

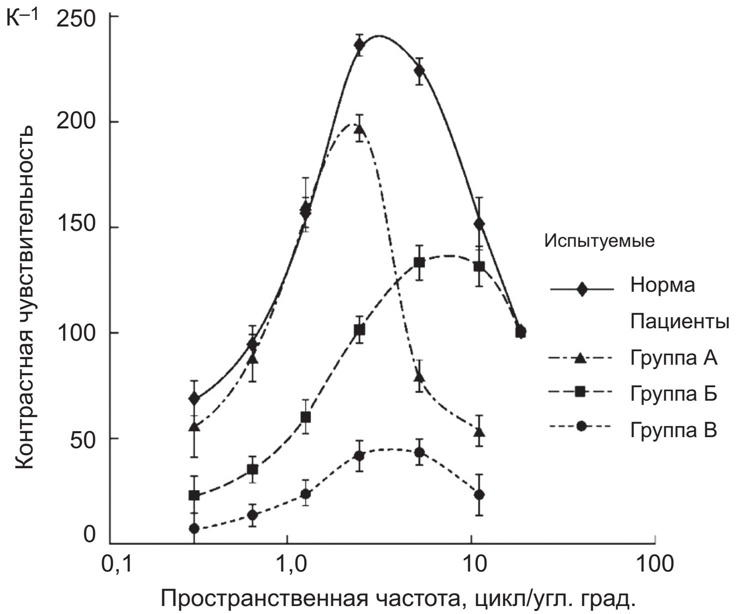


Рис. 5.8. Контрастная чувствительность и стандартные отклонения от порогового значения контраста для различных пространственных частот тестовых решеток Габора. Верхняя кривая — норма. Доминирование снижения контрастной чувствительности в видимом пространственно-частотном диапазоне: А — потеряна чувствительность только в области высоких пространственных частот, Б — низких и средних, В — снижение чувствительности во всем видимом диапазоне. По оси абсцисс — пространственная частота (цикл/угл. град.); по оси ординат — контрастная чувствительность K^{-1}, где K — контраст, рассчитанный по формуле Майкельсона [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]

Для данного исследования нас интересовали пациенты с начальными проявлениями рассеянного склероза, поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только две группы пациентов — А и Б — со снижением в области высоких пространственных частот и со снижением в области низких и средних пространственных частот.

Из рис 5.8 следует, что по данным визоконтрастометрии частотно-контрастные характеристики у различных больных рассеянным склерозом изменяются даже на начальных стадиях (см. группы А и Б) [Муравьева и др., 2008]. Но это не специфический маркер рассеянного склероза, так как нарушения контрастной чувствительности могут происходить в любом участке диапазона пространственных частот при различных заболеваниях [Шелепин и др., 1985]. Особенность рассеянного склероза в том, что он поражает все миелиновые волокна в организме. Но если у пациента на ранней стадии заболевания снижена контрастная чувствительность только на высоких пространственных частотах, можно говорить о доминирующем поражении только тонких миелиновых волокон или, если снижена на низких пространственных частотах, — только толстых. С. В. Муравьевой и соавторами были выделены две группы — пациентов со снижением в области низких пространственных частот и в области высоких пространственных частот [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]. Наглядно это видно на рис. 5.8: кривая контрастной чувствительности у пациентов группы А отражает сохранность контрастной чувствительности в области низких пространственных частот; чувствительность в области высоких пространственных частот у пациентов группы А практически отсутствует, и наоборот, у пациентов группы Б сохранена чувствительность в области высоких пространственных частот.

Была выдвинута гипотеза о специфическом воздействии одного типа течения рассеянного склероза, при котором повреждаются вначале преимущественно тонкие миелиновые волокна, — группа А, и второго типа течения данного заболевания — группа Б, когда заболевание начинается с поражения толстых миелиновых волокон [Муравьева и др., 2004; 2008; 2010]. Проверка этой гипотезы оказалась достаточно простой. Известно, что существует общий принцип действия сенсорных систем, когда входной сигнал любой модальности преобразуется в пространственный код. В слуховой системе высокие звуковые частоты взаимодействуют с тонкими рецепторами и передаются в мозг в определенные пространственные структуры тонкими миелиновыми волокнами, низкие частоты — большими клетками и толстыми аксонами. Это аналогично тому, что происходит в зрении, когда мелкие детали кодируются в мелких рецептивных полях и передаются в мозг каналами, настроенными на высокие пространственные частоты. Низкие частоты передаются в других каналах. Проверка со-

стояла в том, чтобы у одного и того же пациента измерить видеограмму (при условии, если рефракция у него не изменена, рецепторный аппарат в норме) и аудиограмму (при условии сохранности всех элементов среднего уха). Было проведено обследование слуховой и зрительной чувствительности на аудиометре и на визоконтрастометре (нашей конструкции). Результаты аудиометрии и визоконтрастометрии представлены в виде аудиограммы и видеограммы на рис. 5.9. Наглядно продемонстрировано поражение тонких волокон, соответственно мелкоклеточной системы (парвосистемы) и в слуховой, и в зрительной системах.

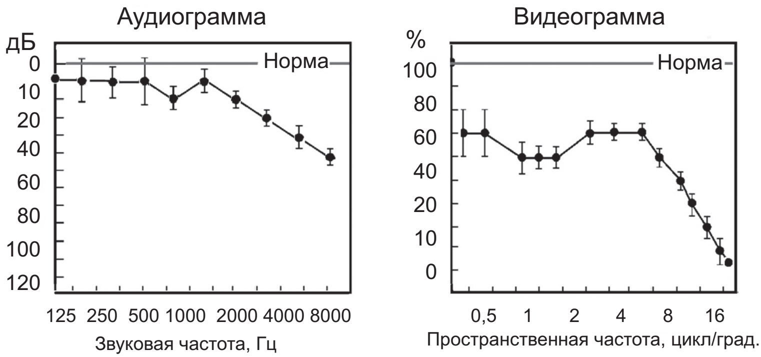


Рис. 5.9. Аудиограмма левого уха и видеограмма левого глаза одного пациента. Аудиограмма: по оси абсцисс — высота звука; по оси ординат — сохранность слуха в дБ относительно нормы. Видеограмма: по оси абсцисс — пространственная частота (цикл/угл. град.); по оси ординат — сохранность зрения в процентах относительно нормы

Избирательное снижение контрастной чувствительности, по данным аудиометрии и визоконтрастометрии, подтверждает справедливость разделения на две функциональные группы клеток, проводящих и обрабатывающих сенсорную информацию в разных органах чувств и, вероятно, в двигательных волокнах.

Обобщив все полученные нами психофизические и электрофизиологические данные, мы можем утверждать следующее. Во-первых, действительно, пациентов с рассеянным склерозом можно разделить на две группы: с нарушением в области низких и средних пространственных частот (доминирование нарушений крупноклеточной системы — магносистемы) и с нарушением в области высоких пространственных частот (доминирование нарушений мелкоклеточной системы — парвосистемы). И во-вторых, была получена взаимосвязь результатов психофизических и электрофизи-

ологических исследований. Полученные данные подтверждают различия в особенностях симптоматики разных групп пациентов в процессе развития рассеянного склероза, патологии, которая в наших исследованиях играет роль «ключа» для изучения функциональных различных свойств магно- и парвосистемы.

Такое разделение на два разных течения рассеянного склероза предполагает разные начальные биохимические и иммунологические процессы в организме. Их поиск не заставил нас ждать; проведенные нами иммунологические исследования также разделяют формы демиелинизации на группы, две из которых — основные. Для одних форм характерно близкое сходство с Т-клеточно-опосредованными и Т-клеточно-плюс антитело-опосредованными аутоиммунными энцефаломиелитами соответственно. Другие формы указывают на первичную дистрофию олигодендроцитов, что напоминает вирус- и токсино-индуцированную аутоиммунную демиелинизацию [Lucchinetti et al., 2000].

Многочисленные клинические наблюдения указывают на то, что у значительной части пациентов с рассеянным склерозом (15 %) выявляется снижение остроты зрения (до сотых) в острый период. Затем появляются центральные скотомы (85,6 %), что характерно для пациентов группы А. Заметим, что нарушения в области высоких частот и центрального зрения легче диагностируются клиницистами и на них чаще обращают внимание пациенты.

Полученные клинические наблюдения позволяют утверждать, что крупноклеточные и мелкоклеточные проводящие пути, нейронные сети имеют не только заметные морфологические отличия, не только разные функциональные свойства передачи разной информации по частоте, но и разную нейробиологическую природу.

В результате измерения зрительных вызванных потенциалов на шахматный паттерн различной пространственной частоты и одного контраста были также получены данные, свидетельствующие в пользу того, что у одной группы пациентов с рассеянным склерозом наблюдаются нарушения в области низких и средних пространственных частот, то есть доминирует поражение крупноклеточной системы; у другой группы пациентов с рассеянным склерозом наблюдаются нарушения в области начальных значений высоких пространственных частот. Можно говорить о том, что при рассеянном склерозе происходит сочетанное снижение чувствительности в том или ином участке видимого и звукового диапазона, что отражает, в частности, поражение проводящих путей, представленных миелиновыми волокнами определенного типа, с определенными морфологическими, электрофизиологическими, функциональными и нейробиологическими свойствами.

ГЛАВА 6

ФОВЕА И ПЕРИФЕРИЯ. «ПЕРИСКОПИЧЕСКОЕ» И «ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЕ» ЗРЕНИЕ

6.1. СТРУКТУРА ФОВЕОЛЯРНОЙ И ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Плотность упаковки в сетчатке рецепторов, размеры рецепторов, плотность упаковки ганглиозных клеток, размеры и временные характеристики рецептивных полей ганглиозных клеток неоднородны по полю зрения. Все они смещаются от центра сетчатки к периферии, то есть изменяются с эксцентриситетом.

Если вернуться к рис. 3.7, можно увидеть изменение спектра изображения стандартного портрета с эксцентриситетом. При фиксации взора на правом зрачке практически все лицо размывается при его восприятии на близком расстоянии. При удалении, когда размер лица соответствует размеру фовеолы (около 1 угл. град.) или даже фовеолиты (представляющей «центральный букет» колбочек), равной всего около 20 угл. мин., все лицо начинает восприниматься как единое целое. Наличие фовеолиты и фовеолы осуществляет сжатие изображения, так как с высоким разрешением передается из сетчатки в мозг только центральная часть поля зрения. С высоким разрешением в мозг передается площадка поля зрения, включающая по величине только 1 % всего поля зрения. В первичной коре

эта площадка в силу фактора магнификации ретинотопического представительства занимает около трети. Эта треть первичной коры занимается обработкой высокочастотной информации и «сшиванием» ее во времени. «Сшиваются» отдельные фрагменты в единое целое при перемещении взора по стоячей картинке в условиях, когда неподвижна голова наблюдателя, а двигаются глаза (см. гл. 1). «Сшиваются» отдельные изображения, приходящие в мозг по высокочастотному каналу, у которого временной квант обработки составляет около 100 мс [Подвигин и др., 1986]. Это «сшивание» сопровождается сжатием информации, но приводит к необходимости построения глазодвигательной системы. Особый интерес представляет работа нейронной сети затылочной коры, осуществляющая сшивание изображений каждые 100 мс.

Баланс между восприятием высоких и низких пространственных частот определяет весь процесс восприятия. Интересно, что ключевую роль в этом играет фовеола, которая расположена в центре сетчатки и в центре рассматриваемых нами событий. Именно поэтому мы рассмотрим роль фовеолы глаза человека в процессе восприятия. Заметим, что период решеток, чувствительность к которым максимальна в угловых градусах, равен размеру фовеолы, а предельная упаковка рецепторов в фовеоле соответствует максимально воспринимаемой пространственной частоте в 60 цикл/угл. град.

Особый интерес представляет принцип раздельного выделения и дальнейшего взаимодействия информации о восприятии низких и высоких пространственных частот. Эти механизмы фильтрации в раздельных каналах зрительной системы работают совместно и согласованно, чтобы обеспечить оптимальное восприятие зрительного мира для деятельности человека.

Зрительную систему уже давно изучают как многоканальную и в пределе двухканальную систему. Например, фотопическое-скотопическое (дневное-ночное) зрение, зрение центральное (фовеальное)-периферическое; для изучения цвета выделены оппонентные пары черно-белые, сине-желтые, красно-зеленые, для изучения формы выделены ориентационно-оппонентные ортогональные системы. Но самая интересная двойственность зрительной системы выявлена при изучении контрастной чувствительности — это двойственность центра и периферии поля зрения (см.: цветная иллюстрация 6.1).

Фовеа находится на расстоянии 4 мм от оптического диска и ниже на 0,8 мм от горизонтального меридиана. Обычно ее видно на уровне, идущем по нижнему краю диска зрительного нерва, реже — ниже, очень редко — над центром диска зрительного нерва. Дистанция от диска до фовеа изменяется не только в каждом индивидуальном случае, но даже бывает раз-

личной у двух глаз одного человека [Lineback, 1927]. Ограничивает фовеа clivus — скат, достигающий края фовеолярной экскавации, самой толстой части сетчатки. Во всей фовеа около 25 000 колбочек. В центре фовеа есть провал — фовеола, а в центре фовеолы — маленькая центральная вогнутость, concavity, получившая название UMBO (navel), или как проще мы ее называем, — фовеолита. В фовеоле — только плотно упакованные колбочки, они более тонкие и длинные, чем в других частях сетчатки. В центре фовеолы — самые тонкие внешние сегменты, светоприемная часть колбочек. Они наиболее плотно упакованы. Французские исследователи называют их «букетом» центральных колбочек [Rochon-Duvigneaud, 1917]. Длина колбочек фовеолиты — 70 мкм, что в два раза больше, чем на краю фовеа, за счет удлинения внешнего сегмента колбочки. Диаметр наружного торца колбочки — 1 мкм, основания — 1,5 мкм, а на краю фовеа — 1,3 и 4 мкм соответственно. На краю фовеолиты появляются единичные палочки. В фовеолите, в этой маленькой области, по данным морфологов, упаковано 2500 колбочек [Duke-Elder, Wybar, 1961].

6.2. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРА И ПЕРИФЕРИИ

По данным измерения контрастной чувствительности для разных пространственных частот видно, что максимум чувствительности приходится на 3–4 цикл/угл. град. Области ниже и выше этого пика чувствительности составляют две системы выделения низкой и высокой пространственной частоты.

Период частоты в 3 цикл/град. равен 20 угл. мин., что соответствует размеру фовеолиты. Известно, что для получения максимальной чувствительности надо, чтобы в решетке было не меньше четырех полос.

Видимый пространственно-частотный диапазон фильтруется по высоким частотам оптикой глаза, а в сетчатке частоты выше 3 цикл/угл. град. обеспечивает фовеальное, а ниже 3 цикл/угл. град. периферическое зрение. В то же время мы знаем, что для передачи в мозг всего видимого диапазона пространственных частот существует множество каналов. Почему же мы разделяем множество каналов на две группы? Они выполняют принципиально разные функции. Аналогия может быть проведена с астрономическим телескопом. Для ориентации мощного телескопа на нем монтируют маленький широкоугольный телескоп для поиска нужной части небесной сферы; по грубым показаниям широкоугольного

малого телескопа мощный телескоп затем ориентируют точно на объект наблюдения.

Именно этот принцип использован и для организации человеческого зрения. Это одновременно дает возможность осознавать глобальное окружение и возможность подробно локально рассмотреть любой объект, требующий распознавания. Для наглядной демонстрации работы этих двух систем рассмотрим два разных заболевания.

Первое — старческая макулярная дегенерация, заболевание, являющееся распространенным вследствие старения населения. Кровоснабжение макулы (центральной ямки) становится плохим и рецепторы в макуле погибают. Острота зрения падает в десять и более раз. В лучшем случае пациенты видят верхнюю строку в оптометрической таблице (Головина—Сивцева). Это заболевание меняет их образ жизни: для чтения текста требуется лупа большой мощности; в связи с полем зрения, пропускаемым лупой, пациенты могут читать только очень медленно, сдвигая лупу от слова к слову. Но эти пациенты могут самостоятельно перемещаться на относительно дальние расстояния; они свободно пересекают оживленную улицу, так как периферическое зрение, передающее низкие пространственные частоты, нормально.

Второе заболевание, тип инвалидности по зрению, — пигментная дегенерация. Это наследственная болезнь, которая начинается в подростковом возрасте и медленно прогрессирует. В последующие десятилетия все периферическое зрение теряется. Это связано с нарушением работы пигментного эпителия сетчатки и разрушением рецепторов. Разрушение начинается в дальней периферии сетчатки и затем прогрессирует к центру. В конечном счете остается центральное зрение. Сохраняется центральное ви́дение, воспринимаются высокие пространственные частоты; у таких пациентов нормальная острота зрения и они могут читать десятую строчку оптометрической таблицы. Они могут узнать лицо друга через улицу, но не могут пересечь улицу, так как оценка движения транспорта, обстановка на дороге не определяется — периферическое зрение отсутствует (нередко даже у себя дома они натыкаются на мебель и т. д.). Это состояние зрения называется туннельным ви́дением. Пациенты, страдающие этим заболеванием, самостоятельно могут передвигаться на не слишком большие расстояния и используют белые трости для предупреждения автомобилистов.

На двух клинических примерах мы продемонстрировали драматичность потери восприятия в области пространственных частот как ниже, так и выше 3 цикл/угл. град.

Теперь разительные отличия в восприятии изображений, поступающих в мозг человека от центра и от периферии сетчатки глаза, сравним с характеристиками изображений, формируемых широкоугольным объективом фотоаппарата (охватывающим, как и оптика глаза, 180 угл. град. поля зрения)

и длиннофокусным, узкоугольным объективом. Мы оцениваем пространство и пространственные отношения с удивительной точностью. Благодаря процессу зрительного восприятия пространства мы можем повернуть наши глаза с точностью до нескольких угловых минут, чтобы фиксировать расположение нового объекта, показавшееся внезапно в периферии поля зрения. Отсутствие пространственных искажений восприятия и наличия высокой угловой точности перевода взора происходит благодаря многим факторам, в частности это связано со сферической формой сетчатки.

Условное название системы для передачи в мозг низких пространственных частот или описания периферии поля зрения — перископическое зрение. Ему противопоставляется телескопическая система — фовеальная, захватывающая примерно один градус, а фовеола — 0,5 градуса (размер фовеолы человека легко представить: он равен угловому размеру ногтя указательного пальца на вытянутой руке). Там находятся только длинно- и средневолновые («красные и зеленые») колбочки, которые плотно упакованы гексагонально для получения максимальной остроты зрения. Высокие пространственные частоты могут быть обнаружены только в фовеа, а самые высокие — в фовеоле. Важно отметить, что область фовеа может принимать участие в выявлении низких пространственных частот, но периферия не может передавать высокие пространственные частоты в мозг.

Все определяется размером функции рассеяния — она разная в центре и на периферии (на периферии больше). Плотность упаковки рецепторов по поверхности сетчатки различна — самая большая в центре. Благодаря фовеа мы можем узнать знакомое лицо на расстоянии от тридцати метров. Кемпбелл и Шелепин (1989) показали, что на таком расстоянии для распознавания лица участвуют только около 169 функциональных пикселей — оптических функций рассеяния точки (анатомический пиксель — рецептор). Кстати, для распознавания простых изображений функциональных пикселей зрительной системы требуется меньше; например, для распознавания букв — всего 25, а восприятие звезды или планеты требует только одной функции рассеяния точки — задействован один функциональный пиксель зрительной системы, состоящий всего из 3–7 гексагонально упакованных колбочек.

Когда человек смотрит вокруг, он не осознает того, что две зрительные системы — перископическая и телескопическая — одновременно анализируют окружающую среду.

Пространственно-частотные каналы организованы из систем рецептивных полей нейронов сетчатки, наружного коленчатого тела и зрительной коры. Клетки, обрабатывающие фовеальную информацию, обычно мелкие (парво), а обрабатывающие периферическую информацию — крупные (магно). Соответственно они имеют разные по размеру дендритные отрост-

ки (и площадь их ветвлений), а также разные по размеру рецептивные поля. Поэтому можно утверждать, что периферическое зрение обеспечивается магносистемой, а центральное — парвосистемой.

Основную обработку информации о форме объектов обеспечивает маленькая (5 %) часть сетчатки — фовеа. Тут в основном сосредоточены мелкоклеточные структуры, формирующие парвоканалы. Эти 5–10 % сетчатки представлены 70–80 % первичной зрительной коры. Они обрабатывают информацию о высоких пространственных частотах, поэтому требуется много клеток. Увеличение представительства центрального поля зрения в коре, получившее название фактор магнификации, объясняет многие зрительные эффекты. О том, что эта часть осуществляет важнейшие зрительные функции благодаря большому числу нейронов, говорит тот факт, что именно фовеа распознает сложные объекты в поле зрения.

Центральная часть поля зрения — фовеола, обеспечивающая ви́дение высоких пространственных частот, — занимает очень большую площадь в затылочной коре, почти столько, сколько все остальное поле зрения. Периферия, передающая низкие пространственные частоты, представлена экспоненциально убывающей представительством фовеа в первичной зрительной коре. Поле зрения каждого из глаз может обнаружить объект приблизительно на расстоянии 110 угл. град. от точки фиксации взора. Это позволяет заметить появившийся объект на периферии поля зрения.

Условие, при котором среднее значение освещенности сетчатки (как в пространстве, так и во времени) остается постоянным и достаточно высоким, обеспечивает фотопическое дневное зрение человека. Мы можем заключить, что каналы, постулированные в психофизических экспериментах, проведенных в 1960-х годах для фотопического зрения, имеют реальное нейрофизиологическое воплощение в нейронных сетях системы «сетчатка — зрительная кора». Рецептивные поля нейронов затылочной коры есть выходы каналов зрительной системы, настроенные на разные временные и пространственные частоты. За последующие три десятилетия были твердо установлены психофизические и нейрофизиологические доказательства существования каналов и установлено, что информация об окружающем мире кодируется различными пространственно-частотными и временными каналами зрительной системы.

Таким образом, макула, фовеа и фовеола не просто обеспечивают работу зрительной системы с высоким разрешением. Выполняется еще и другая важнейшая зрительная функция — упорядочивание зрительного поля зрения для распознавания формы объектов, и это распознавание осуществляется относительно собственного центра фовеолы. Проведение оценки пространственных отношений и положения объектов в пространстве [Шелепин и др., 1991; 1993] осуществляется нейронами затылочной и

теменной коры. Выход каналов, который расположен в затылочной коре, соединен еще и с нижневисочной корой, которая обеспечивает хранение описания формы, объектов, сохраняет тезаурус.

Зрительная кора выполняет две операции: 1) определение глобальных статистических свойств изображений; 2) выделение локальных информативных признаков высшего порядка. Эти подходы описывают два различных механизма, которые могут быть задействованы для распознавания изображений объектов. Проблема состоит в том, чтобы понять, при решении каких задач какой из этих подходов доминирует. Большинство нейрофизиологических исследований посвящено локальному анализу, который осуществляют клетки первичной зрительной коры V1 или V17.

Исследование механизмов и алгоритмов реконструкции целостного объекта из фрагментированного является многообещающим прежде всего в решении проблемы распознавания зрительных образов. Наш подход построен на основе представлений о выделении сигнала из шума и модели согласованной фильтрации нейронами зрительной коры [Красильников, Шелепин, 1996; 1997].

6.3. ВРЕМЕННЫЕ, ДИНАМИЧЕСКИЕ ОТЛИЧИЯ ЦЕНТРА И ПЕРИФЕРИИ

При определенных скоростях движения наблюдаемых объектов могут возникать искажения восприятия — иллюзии. Их возникновение связано с тем, что зрительная система способна работать в определенном диапазоне скоростей движения наблюдаемых объектов. За пределами этого диапазона возникают искажения восприятия, связанные со структурно-функциональными особенностями организации зрительной системы. Рассмотрим пространственно-временные искажения восприятия движущихся изображений.

Позвольте начать с личного описания того, как автором была замечена зрительная иллюзия искривления движущихся решеток. Зимой, двигаясь по мосту в трамвае и глядя через ограждение моста на лежащее на льду реки ведро, я зафиксировал взгляд на этом ведре и увидел (вернее, почувствовал) искривление стоек ограждения. На следующий день в лаборатории мы вместе с Н. Ф. Подвигиным сделали методику и провели измерения; нами был обнаружен целый набор иллюзий, но в данной главе рассмотрим лишь одну — иллюзию искривления движущихся полос разной ширины и решеток с различной пространственной частотой.

Для ее обнаружения наблюдателя располагали на расстоянии 115 см от белого экрана. По экрану в пределах прямоугольного растра шириной 3,7

и высотой 15,5 град. двигали изображения, они заполняли растр. Изображения представляли собой решетки, образованные набором вертикальных полос с прямоугольным профилем освещенности. Число полос в решетках было различным для каждой из решеток и зависело от пространственной частоты, которая менялась в диапазоне 0,21–6,70 цикл/град. Испытуемый видел на экране лишь часть решетки, ограниченную размером растра. Освещенность светлых полос в решетке (на экране) составляла 75 Лк, темных полос — 4 Лк, общая фоновая освещенность экрана — 2,5 Лк. В ряде опытов в качестве стимулов были использованы одиночные полосы с прямоугольным профилем освещенности. Освещенность полос — 95 Лк. Скорость движения изображений могла меняться в пределах 0,63–63,0 град./сек. Испытуемому предлагалось фиксировать взор на красной точке, расположенной на экране в центре растра, в котором двигалось тестовое изображение. Экспериментатор мог изменять скорость движения решетки. По ответам испытуемого фиксировали ту минимальную скорость, при которой наблюдалась иллюзия.

Вид иллюзии изображен на рис. 6.1. Это изображение схематично, так как передние по направлению движения края каждой полосы движущихся решеток кажутся наблюдателю размытыми. Скорость движения изображения, критическая для возникновения иллюзии, определяли для полос шириной 3,1; 2,6; 1,7; 0,6; 0,25; 0,2 град. и для решеток всего указанного набора пространственных частот.

Для четкого наблюдения иллюзии необходимо соблюдение двух условий: постоянная фиксация взора во время движения решетки по экрану и необходимость использования таких стимулов, у которых пространственная частота и скорость движения были бы связаны зависимостью, отображенной на рис. 6.2. Испытуемым казалось, что при определенных скоростях движения решетки в области точки фиксации взора происходит искривление в действительности прямых вертикальных полос решетки (или одиночной полосы). Схематическое изображение иллюзии см. на цветной иллюстрации 6.2.

Форма искажений изменяется зеркально в зависимости от направления движения решетки: слева направо или справа налево. Кроме того, в ряде случаев в зависимости от «переключения внимания» эффект может субъективно восприниматься как искажения только черных движущихся полос на светлом неподвижном фоне либо движущихся светлых полос на светлом фоне. Можно утверждать, что в 1978 году нами была открыта не только иллюзия искривления движущихся полос, но и динамический вариант известных иллюзий чередования фигуры и фона.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 6.2. По оси ординат откладывали значения скоростей движения решетки, при

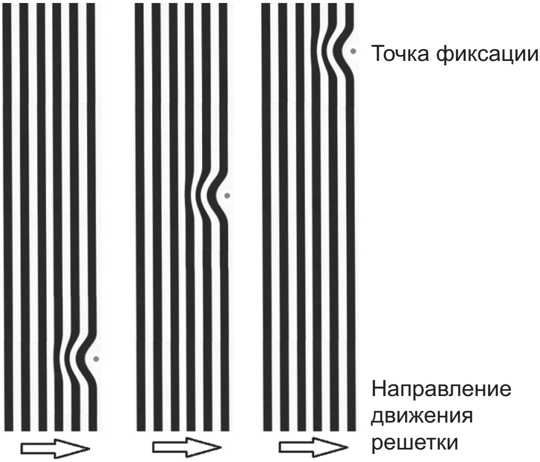


Рис. 6.1. Схематическое изображение иллюзии локального искривления движущейся решетки, возникающего при ее движении и фиксации взора на неподвижном объекте, «точке». Масштаб решетки — в угловых градусах. Стрелка указывает направление движения. Смещение точки фиксации приводит к смещению кажущегося искривления решетки

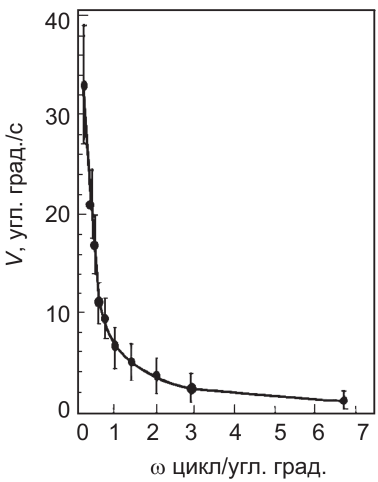


Рис. 6.2. Скорости движения и пространственные частоты решеток, при которых наблюдается иллюзия. По оси ординат — скорость (*v*) движения решетки, в град./сек. По оси абсцисс — пространственная частота (*w*), в цикл/град. Точки — средние значения экспериментальных данных, полученные на шести испытуемых. Горизонтальные штрихи — величина среднеквадратических отклонений от средних

которых наблюдалась описанная иллюзия, а по оси абсцисс — пространственная частота данной решетки. Полученная кривая имеет вид уравнения гиперболы:

$$V = a/w,$$

где a — константа, равная 6,3 при данных условиях освещенности; V — пороговая скорость движения решетки; w — пространственная частота.

Все значения скоростей и пространственных частот для точек, расположенных под кривой (рис. 6.2), определяют рабочий диапазон зрительной системы при условиях освещенности, указанных выше. В области, соответствующей скоростям и пространственным частотам, выше приведенной кривой мы видим объект с искажениями: вначале видна иллюзия, затем полосы сливаются.

При критических для возникновения иллюзии скоростях движения изображения время прохождения через точку в поле зрения одной полосы (полупериода) тестовых решеток различной пространственной частоты должно определяться пространственной частотой (w) решетки и скоростью движения (v). Значения времени изменяются мало от пространственной частоты решетки. Среднее время равно 72 ± 6 мс. Постоянство этой величины легко предсказать из уравнения гиперболы, где a — постоянная величина, имеющая размерность временной частоты 1/с.

Наблюдаемую иллюзию можно объяснить на основании имеющихся психофизиологических и нейрофизиологических данных. Известно, что для зрительной системы справедлив закон временной суммации [Глезер, 1962]:

$$Jt = \text{const},$$

то есть до какого-то времени (t — крит.) происходит обмен пороговой интенсивности (J) стимула на длительность (t) его предъявления.

Этот же закон справедлив и для рецептивных полей одиночных нейронов зрительной системы. Показано, что размеры рецептивных полей увеличиваются от центра фовеа к периферии сетчатки [Bloch, 1885].

Скорость движения решеток, при которой возникает иллюзия, зависела от пространственной частоты. При увеличении скорости движения решетки выше критической иллюзия исчезает и происходит слияние движущихся полос. Сопоставим эти два факта. В наших условиях эксперимента энергия входного сигнала для больших и малых рецептивных полей будет различна. Чем меньше рецептивное поле, тем меньше время пребывания в нем движущейся тестовой полосы. Вследствие этого чем ближе рецептивное поле к центру сетчатки, тем меньше сигнал на его выходе и, следовательно, больше скрытый период, с которым предается этот сигнал в нейронной сети. Поэтому при движении полосы сигнала от малых

(фовеальных) рецептивных полей, через которые проходит данная полоса, имеют большую временную задержку, чем сигналы от больших периферических полей. Это различие во временных задержках при движении полосы и воспринимается наблюдателем как искажение формы полосы в описанной иллюзии.

Решетка без изображенных искривлений наблюдается при неподвижной решетке, при малой скорости ее движения. Скорость движения, при которой возникает иллюзия, связана гиперболической зависимостью с пространственной частотой решетки. Эта зависимость определяет «рабочий диапазон» зрительной системы при наблюдении движущихся изображений.

6.4. «ПЕРИСКОПИЧЕСКОЕ» И «ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЕ» ЗРЕНИЕ. НАВЕДЕНИЕ ВЗОРА НА ЦЕЛЬ

Глядя через телескоп или перископ, мы видим изображения разных участков пространства с разным разрешением. Большой участок пространства с малым разрешением виден через перископ (от др.-греч. ϖερι — «вокруг» и σκοπέω — «смотрю»). Маленький участок пространства с большим разрешением виден через телескоп. Эти явления имеют некоторое сходство с тем, что называется перископическим и телескопическим зрением человека. Но есть принципиальная разница, которая заключается в том, что в сетчатке глаза присутствуют разные каналы с разной дискретизацией. Элементы грубой дискретизации пространства с большими рецептивными полями, перекрывающими почти всю сетчатку, дают глобальное описание пространства, которое напоминает перископическое зрение. Элементы высокой дискретизации с мелкими рецептивными полями собраны только в центре поля зрения в области фовеолы. Их деятельность напоминает телескопическое зрение, но оно в отличие от телескопа не увеличивает угловые размеры изображения объекта, а увеличивает число элементов разрешения на объект за счет высокой плотности рецепторов в центре сетчатки. Иными словами, роль увеличения сводится к увеличению числа элементов дискретизации на объект. Это число фиксировано плотностью рецепторов. У человека достигается максимум дискретизации числа элементов на объект. Дальнейшее увеличение возможно только с применением оптической техники.

Ширина поля зрения составляет до 200 угл. град. по горизонтали и 135 по вертикали. Область бинокулярного перекрытия по горизонтали — 120 угл. град. на 135 угл. град. — по вертикали. Рабочая область для многих

профессий — 60 угл. град. — это дисплей и окружающее пространство рабочего стола (рис. 6.3).

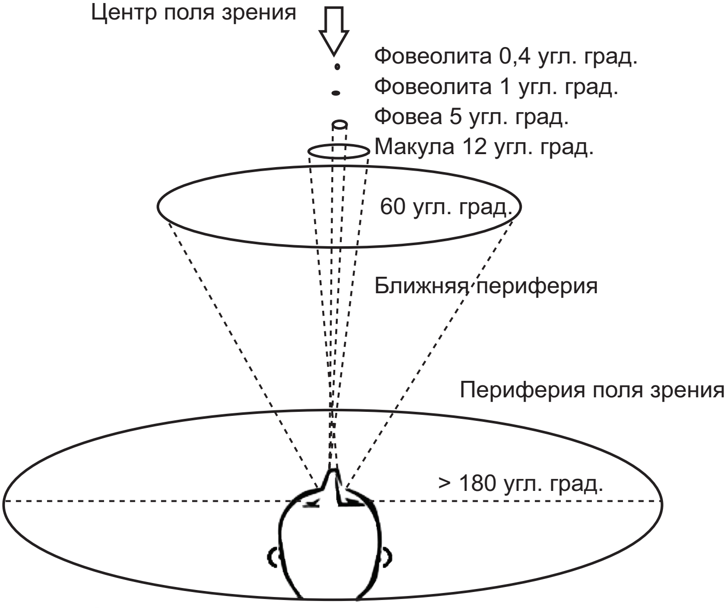


Рис. 6.3. Бинокулярное поле зрения

Для чтения необходимо иметь сохранной центральную часть поля зрения фовеа — для крупного текста и фовелиту — для текста мелкого. При вождении автомобиля требуется работа периферии — края поля зрения оценивают обстановку в потоке автомобилей, а фовеола — ситуацию вдали, знаки, поведение пешеходов. Ближняя периферия дает оценку планом водителей впереди, в соседних полосах.

Есть самая важная зрительная иллюзия, о которой практически не говорят, но именно эта иллюзия сопровождает наше зрение постоянно. Нас как бы не тревожит то, что объекты в разных частях поля зрения сетчатка описывает с разной степенью детализации. Не тревожит ничего, кроме почти подсознательного снижения различимости деталей. Слово «подсознательный» в данном контексте — очень условный термин, и мы его применяем почти на бытовом уровне для описания самых разных явлений. Мы понимаем, что на периферии видим детали хуже или вообще не видим, но зачастую переводим взор на интересующий нас объект неосознанно, автоматически. Кажется,

что при положении интересующего нас объекта на периферии поля зрения в его рассмотрении нам чего-то не хватает, но мы не видим его размытым. Мы стремимся перевести взор, чтобы увидеть больше. Для того чтобы иметь возможность утверждать, что мы видим объект размытым, мы должны иметь в этой части пространства вход для обработки в двух каналах — высокочастотном и низкочастотном. Если нет высокочастотного канала, а его нет на периферии, размытость изображения мы не увидим. Еще раз укажем на то, что глаз только на сравнительно небольшой территории вокруг точки фиксации взора имеет возможность видеть мелкие детали. Периферия сетчатки глаза хорошо выявляет и локализует объекты (даже если глаз не может распознавать их), инициирует команды перемещения центра взора на изображение для его более детального рассмотрения. Действуя совместно и с помощью окуломоторной системы, перископическое и телескопическое зрение обеспечивает полный зрительный контроль появившегося объекта в течение 200–300 мс с момента его появления в поле зрения.

Почему именно макула организует поле зрения для решения задач распознавания объектов? Пространственно-частотные каналы с шириной приблизительно 1,5 октавы пространственно центрированы относительно фовеа. Они организуют зрительное поле. Зрительное поле — это активная система с центром и периферией, функционально различными, обеспечивающая во взаимодействии зрительный процесс. Высокая разрешающая способность центра макулы не означает невозможность обработки разных участков окружающей сцены только периферическими низкочастотными каналами. Но именно они дают сигнал для перевода фовеа, перевода взора в разные части поля зрения человека.

Человек не осознает свои непроизвольные движения глаз при рассмотрении сцены (их количество составляет 2–3 в сек.). А. Л. Ярбус [1967] показал, что эти движения глаз являются не только постоянными, но и зависят от содержания сцены и инструкции наблюдения данной сцены. Например, если наблюдается лицо человека, то непроизвольные движения глаз наблюдателя сосредоточены вокруг глаз, носа и рта с редкими движениями, направленными на уши и волосы и т. д.; если наблюдаемая сцена — комната с определенным количеством предметов, то непроизвольные движения глаз сгруппированы вокруг различных объектов, представляющих интерес. Перископическая система может включать первоначально всю сцену полностью, а затем, при рассмотрении мелких деталей, подключается телескопическая система, определяя соответствующие объекты последовательно.

Карты движений глаз — это не только результат подсознательного анализа сцены, но и сознательной, целеустремленной деятельности. Это могут быть внутренние побуждения, зрительный поиск, выполнение инструкций, полученных наблюдателем от экспериментатора.

В условиях свободного наблюдения динамических изображений глаз обычно покоится в центре наблюдаемой сцены и совершает небольшие колебания вокруг него. При наблюдении ограниченной сцены с меняющимся сюжетом (например, кинофильм) наибольшая вероятность положения взора — на центре изображения, в центре кадра. В зависимости от сюжета, конечно, постоянно совершаются движения глаз по кадру, но доминирует центральное положение как наиболее выгодное в условиях неопределенности появления привлекательных элементов сцены в последующих кадрах. Если происходит наблюдение постоянно смещаемого в одну сторону изображения, начинается ритмический «захват кадров», например развивается железнодорожный нистагм у пассажира, глядящего в окно на пробегающие рядом с поездом сцены; если поезд идет по степи, то глаза могут быть устремлены вдаль на почти неподвижный объект (см.: цветная иллюстрация 6.3).

Машинист, поезда, водитель автомобиля обычно держат точку фиксации на удаленных мало подвижных объектах, а дорожная обстановка регулируется преимущественно периферией поля зрения.

Перевод фовеолы в нужную часть пространства осуществляет глазодвигательная система. Движение каждого глазного яблока осуществляют шесть мышц, которые находятся под контролем глазодвигательных нервов. Самая высокая степень иннервации глазодвигательных мышц обеспечивает возможность в соответствии с командой из мозга синхронно и с большой точностью и скоростью наводить оба глаза на объект. Точность управления требуется, чтобы свести объект внимания и фовеолу с большим разрешением для подробного обследования объекта.

Управление движениями глаз, в частности произвольными и непроизвольными, связано с периферией поля зрения. Перископическое зрение использует низкочастотную пространственную информацию. Сотрудница нашей лаборатории А. Ламминпия провела исследования количества, скорости, частоты и т. д. движения глаз, а С. Бауэр из Санкт-Петербургского государственного университета построила математическую модель, которая позволяет сравнить «энергозатраты» глаза при чтении текста, при рассматривании картин и при устремлении взгляда в одну точку, то есть при разных стратегиях наведения взора. Самым «энергозатратным» оказался перевод взора при чтении, глазное яблоко испытывает при чтении самые большие нагрузки.

Телескопическое и перископическое зрение — это, конечно, упрощенная модель общих закономерностей кодирования информации в зрительной системе человека. Эта модель, представляющая обработку пространственной информации системой «центр — периферия», сильно упрощает задачу понимания работы мозга. Тем не менее она позволяет не только объяснить, но и предсказать ряд важных процессов зрительного восприятия. Например, работу бинокулярной зрительной системы и возникновение стереозрения нельзя понять , не зная различий в фовеа и периферии сетчатки. Оба гла-

за, даже при наличии точки фиксации, никогда не наведены на одну и ту же точку пространства. Параллакс и стереозрение — это известно всем. Но мало кому известно, что если одному глазу и другому глазу раздельно с помощью стереоскопа представить два изображения одного объекта, различающиеся только по пространственно-частотному спектру, тоже возникает стереоэффект. То есть он возникнет, если в одном изображении содержатся преимущественно низкие пространственные частоты, а в другом — преимущественно высокие пространственные частоты. В результате бинокулярного слияния (фузии) мы воспринимаем изображенный объект или сцену как объемные, хотя тестовые изображения не имеют диспартности. Отличие есть только в пространственно-частотном спектре. Это происходит всегда, даже в обычной обстановке; при повседневном наблюдении наше перископическое и телескопическое зрение обоих глаз при наведении на один объект работают так, что один глаз видит его четко, а другой глаз — слегка размытым, в результате их пространственно-частотные спектры различны.

Переход от телескопической к перископической системе построен как своеобразная иерархическая система. Такая сложная система была описана ранее пирамидальной моделью [Шелепин и др., 1995; Burt, Adelson, 1983]. Однако в действительности фовеа занимает гораздо большую область в коре, чем периферия. Она имеет множественное представительство в коре. В эволюционном развитии в результате естественного отбора неоднократно происходило разделение периферического и центрального зрения. Две крайние формы — у пауков и приматов, включая человека. Пауки имеют и две, и три, и четыре пары глаз. У пауков свойственное человеку центральное фовеолярное и периферическое зрение реализовано как две или даже три совершенно раздельные системы пары глаз. У них есть глаза кругового обзора и глаза наведения на цель. Наведение на цель у пауков осуществляется за счет поворота ног [Аверьянова, 2013]. В последние годы такой же принцип был использован в технике. Флот оснащен оптической системой кругового обзора, захвата цели и слежения, а также другой оптической системой — высокого разрешения для наведения на цель огневой защиты надводных кораблей [Московченко и др., 2014] (см.: цветная иллюстрация 6.4).

У приматов, кошек, собак системы контроля периферии и система наведения на цель соединены в одной сетчатке благодаря различиям в конструкции фовеа и периферии. Перевод взора с высоким разрешением на цель осуществляется системой глазодвигательных мышц и управления аккомодацией. Создание системы с высоким разрешением по всей сетчатке требует огромных «вычислительных» ресурсов мозга. Итак, фовеола, занимающая менее 1 % поля зрения, требует для работы более 70 % ресурсов первичной зрительной коры. Увеличение разрешения для всей сетчатки привело бы к увеличению мозга в несколько раз и, вероятно, сделало бы невозможными роды (пропорциональное увеличение таза делает невозможной ходьбу).

ГЛАВА 7

ЛОКАЛЬНЫЙ И ГЛОБАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

7.1. ЛОКАЛЬНЫЙ И ГЛОБАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ, ГЕШТАЛЬТПСИХОЛОГИЯ И НЕЙРОФИЗИОЛОГИЯ

Рассмотрим два подхода в исследовании восприятия изображений зрительной системой: определение глобальных статистических свойств изображений и выделение локальных информативных признаков высшего порядка. Эти подходы описывают два различных механизма, которые могут быть задействованы для распознавания изображений объектов. Работу данных механизмов рассмотрим на примере распознавания неполных изображений.

Изучение алгоритмов восприятия неполных изображений объектов было начато создателями гештальтпсихологии [Koffka, 1935; Kohler, 1947; Wertheimer, 1938]. Интенсивные исследования последних лет в данной области обусловлены потребностями развития методов цифровой обработки и восстановления изображения.

Психофизические и нейрофизиологические исследования как локального, так и глобального анализа в зрительной системе могут быть разделены на две группы: изучение пространственных механизмов связывания и изучение временных процессов взаимодействия нейронов, в результате

которых происходит связывание фрагментов в единое целое, в гештальт [Каменкович, Шевелев, 2006; Подвигин и др., 2005; Шевелев и др., 2000; 2001; 2003; Шелепин, 2001; Biederman, 1987; 1991; Braddick et al., De Winter, Wagemans, 2004; Field, 1987; 1994; 1997; 2004; Fries et al., 2002; Giersch et al., 2000; Gollin, 1960; Gruber et al., 2002; Hess, Field, 1994; 2003; Hubel, Wiesel, 1983; Hummel, Biederman, 1992; Kanizsa, 1979; Kelman, Spelke, 1983; Mathes, Fahle, 2007; May, Hess, 2007; Murray, Szymczyk, 1978; Olhshausen, Field, 1996; 1997; 2004 a; 2004 b; Singh, Fulvio, 2007; Snodgrass, Hirschman, 1994; Snodgrass et al., 1987; 1992; Spitz, Borland, 1971; Tversky et al., 2004]. Данный обзор наших работ ограничен исследованием пространственных механизмов.

Решение проблемы связывания фрагментов в единое целое позволит ответить на целый ряд важнейших вопросов: какие оптические свойства изображения являются информативными; как осуществляется переход от оптического описания изображений к их представлению в зрительной системе; как зрительная система распознает целостный объект при наблюдении его фрагментов; как зрительная система выделяет физические свойства фрагментов; какие нейрофизиологические механизмы в зрительной системе обеспечивают сравнение фрагментов и объединение их в целостный образ?

Мы уже говорили, что локальные признаки делят на обычные, общие для всех категорий изображений (точки, фрагменты контура и локальные текстуры) и специфические (информативные) локальные признаки, которые характерны для конкретных изображений. Обычные признаки выделяют рецептивные поля зрительной системы на ранних стадиях обработки изображения. К специфическим признакам можно отнести, например, характерные фрагменты контура, имеющие ключевое значение [Attneave, 1954; 1955]. По таким специфическим фрагментам можно распознать предъявленный объект, но только в том случае, если заранее известно множество (алфавит), к которому данный объект принадлежит. Специфические признаки, как и обычные, выделяются в зрительной системе детекторами точек, линий, углов, крестов, но эти признаки имеют сигнальное значение. Специфические признаки в нейрофизиологии называют признаками высшего порядка [Бабенко и др., 2010 ; Шевелев и др., 2000; 2001; 2003; Hubel, Wiesel, 1962; 1968].

Изображение наблюдаемого объекта представлено в мозге системой параллельных информационных каналов — рецептивных полей. Для выделения объекта и описания целостного образа (гештальта) отклики этих полей должны быть связаны. В первичной зрительной коре эта взаимосвязь наиболее выражена между нейронами, выделяющими элементы контура с одной ориентацией. Изменение ориентации непрерывного контура и разрывы контура усложняют задачу [Field, 1987; 1994; 1997; 2004].

7.2. ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО И ГЛОБАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Для исследования порогов восприятия фрагментированных фигур мы применяем различные методы. В первую очередь рассмотрим результаты исследования с помощью Голлин-теста [Gollin, 1960]. Голлин-тест заключается в предъявлении контурных изображений различной степени фрагментации и в измерении порогового значения фрагментации, при котором происходит распознавание формы тестовой фигуры. Принцип формирования фрагментированных изображений в современной версии Голлин-теста хорошо известен [Шелепин, 2001; Шелепин и др., 2004; 2008; Chihman et al., 2001 a; 2001 b; 2006; Foreman, Hemmings, 1987].

При измерении порогов методом пределов фрагменты изображения предъявляют в сериях с инкрементным шагом, с каждым последующим шагом увеличивается полнота представления контура. В Голлин-тесте происходит «нарастание» числа фрагментов контура по мере предъявления стимула. В его основе лежит общеизвестный метод пределов [Бардин, 1976]. Именно Голлин-тест представляется методически удобным приемом для фундаментальных исследований алгоритмов и механизмов распознавания зрительных образов. Первоначально тест выполняли с помощью пошагового предъявления набора карточек, каждая последующая из которых содержала на 5 % больше величины контура изображения какой-либо общеизвестной фигуры, чем предыдущая. В процессе исследования фиксировали величину контура, при которой наблюдатель правильно идентифицировал фигуру. Впоследствии, с появлением компьютеризированной версии теста, стало возможным организовать более точное с каждым шагом увеличение количества фрагментов фигур [Foreman, Hemmings, 1987]. С применением этой версии изучен широкий диапазон вербального и невербального материала для использования в качестве тестовых стимулов в психологических и клинических исследованиях [Дешкович и др., 2000; 2004; Foreman, Hemmings, 1987; Mack et al., 1993; Snodgrass, Poster, 1992; Warrington, 1982; Warrington et al., 1967; 1968]. Голлин-тест в клинических исследованиях нарушений памяти показал зависимость порога восприятия фрагментированных изображений от сохранности определенных областей мозга [Patterson et al., 1999; Shum et al., 1999; Warrington, 1982; Warrington et al., 1967; 1968]. Так, по сравнению с контрольными испытуемыми пациентам с правосторонним теменно-затылочным поражением требовалось предъявлять большую величину контура, чтобы был сформирован гештальт [McCarthy, Warrington, 1990; Vakil et al., 1992; Warrington, 1982; Warrington et al., 1967; 1968].

В нашей лаборатории была создана удобная программа измерения порогов в опытах с Голлин-тестом, установлена природа Голлин-теста как задачи выделения сигнала из помехи [Дешкович и др., 2000; 2004; Шелепин, 2001; Шелепин и др., 2004; 2008; Chihman et al., 2001 a; 2001 b; 2006; Shelepin et al., 2004], установлена зависимость порогов распознавания Голлин-теста от эмоционального состояния испытуемых [Лавров, Рудинский, 2004].

Голлин-тест традиционно рассматривали как тест восприятия неполных фигур или «замыкания контура», хотя до сих пор не затихают споры о том, как это «замыкание контура» осуществляется. Одно из направлений исследований сконцентрировано на изучении локальных признаков. Сторонники этого направления предполагают, что в основе алгоритма распознавания неполных, фрагментированных изображений лежит алгоритм выделения информативных признаков. Впервые экспериментально выделение признаков в зрительной системе было установлено Горацием Барлоу в 1953 году [Barlow, 1953]. Изучая зрение лягушки, он предположил, что детекторы признаков определенных классов изображений заложены генетически. В дальнейшем модель выделения признаков была широко развита [Шевелев и др., 2000; Hubel, Wiesel, 1968, 1963]. В коре млекопитающих были выделены детекторы линий, решеток, углов и т. д. У человека, как и у других млекопитающих, система выделения простых признаков закладывается генетически, но ее реализация происходит в первые недели постнатального развития при условии возможности наблюдения натуральных сцен. Роль информативных признаков для распознавания была изучена в восприятии у взрослых и детей [Murray, Szymczyk, 1978].

В соответствии с геонной теорией Бидермана, объекты распознаются как конфигурации примитивов, называемых геонами (геометрические ионы) и находящихся в специфическом соотношении друг с другом. В свою очередь, геоны распознаются с помощью ряда инвариантных свойств контура (прямолинейность, изгиб, параллельность, тип вершин, пересечений и т. д.). Изучалось распознавание контурных изображений с систематически удаляемыми компонентными участками. Было показано, что не все сегменты контурного изображения фигуры одинаково информативны для распознавания, которое зависело от включения или пропуска возможных информативных признаков [Biederman, 1987; Biederman, Cooper, 1991; Hummel, Biederman, 1992].

Чтобы выявить роль информативных признаков высшего порядка, были разработаны неполные фигуры, которые избирательно включали или не содержали информативные признаки. Такими признаками, например, могли быть вершины, пересечения, экстремальные точки изгиба контура [Bentley, Deregowski, 1987; DeWinter, Wagemans, 2004]. Нейрофизиологическим механизмом, описывающим эти признаки, являются свойства рецептивных

полей нейронов зрительной коры, избирательных к линиям определенной ориентации, торцам линий, углам и пересечениям [Шевелев и др., 2000; 2001; Hubel, Wiesel, 1968; 1983].

Модель восприятия на базе информативных признаков не вполне подходит для объяснения распознавания неполных Голлин-фигур, особенно когда при использовании методом пределов в случайном порядке предъявляется очень малое количество фрагментов контура, а наблюдатель не знаком с набором тестовых изображений. В Голлин-тесте распознавание возникает во многом независимо от положения отдельных фрагментов и независимо от последовательности их предъявления. На рис. 7.1 показаны примеры двух пороговых изображений Голлин-теста с одинаковым процентом величины контура, но с разной последовательностью выведения фрагментов для его заполнения [Foreman, 1991; Foreman, Hemmings, 1987].

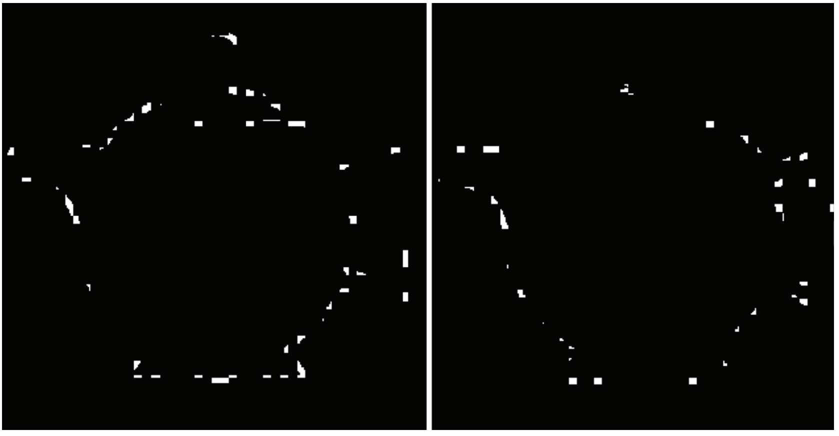


Рис. 7.1. Фрагментированные пороговые Голлин-изображения с одинаковым процентом заполнения контура, но с разной последовательностью вывода фрагментов

В приведенных примерах двух реализаций Голлин-теста процент выведения контура на левом и на правом рисунке одинаков, отличаются взаимные положения фрагментов. Результаты исследований с различной последовательностью появления фрагментов в Голлин-тесте одних и тех же изображений наглядно показали, что неполные фигуры на пороге распознавания имеют различное пространственное размещение фрагментов, но порог распознавания, выраженный в значениях процента контура, остается одинаковым.

Еще один результат проведенных нами исследований подтвердил наши сомнения в отношении справедливости утверждения о ключевой роли информативных признаков высшего порядка при решении задач по распознаванию изображений, алфавит которых не был выучен испытуемым. Для этого проводили измерения движений глаз при определении порогов распознавания Голлин-теста. Оказалось, что наблюдатель при решении этой задачи не прослеживает взором контур, не ищет информативные ключевые точки, а фиксирует взор в центре тяжести тестовой фигуры или колеблется вдоль основной оси этой фигуры (см.: цветная иллюстрация 7.1), удерживает взор в центре тяжести появляющихся фрагментов. Достижение порога распознавания отождествляется с возникновением инсайта и сопровождается выраженной эмоциональной реакцией [Шелепин и др., 2015; 2017] (статья в «Оптическом журнале» [2015] сопровождается ссылкой доступа к программному обеспечению, созданному С. В. Прониным для реализации этого метода). Методика Голлин-теста оказалась чрезвычайно полезной для важнейшего продукта неосознаваемой деятельности мозга эффекта инсайта, озарения. Это открывает новые возможности исследования нейрофизиологических механизмов осознаваемых и неосознаваемых процессов, связанных с аналитическим последовательным решением задач и решением задачи путем озарения. Нейронные сети, обеспечивающие инсайт, работают, как и в других задачах, на основе оппонентных взаимодействий [Шелепин и др., 2015; 2017].

На цветной иллюстрации 7.1 представлена схема динамического процесса, регистрируемого на видео. Наиболее яркие точки соответствуют центру тяжести фигуры, а не информативным точкам. Например, на будильнике это стрелки, и на них будет фиксация в задаче определения времени. В задаче распознавания фигуры, в условиях неопределенности, взор начинает фиксацию с достаточно быстро определяемой по первым фрагментам центра тяжести фигуры [Шелепин, 2015]. Роль фиксации взора по центру тяжести была высказана Дж. Моллоном в его первой работе [Mollon, 1968]. Он рассматривал иллюзию, которую впервые описал немецкий психиатр Ф. Мюллер-Лайер еще в 1889 году; иллюзия состоит в ошибочной кажущейся разнице двух одинаковых отрезков, обрамленных оперением внутрь (длина кажется меньше) и наружу (длина отрезка кажется больше). По мнению Моллона, ошибочная оценка длин отрезков с оперением внутрь и наружу в иллюзии Мюллер-Лайера связана с оценкой не длины собственно отрезка, а с оценкой расстояния между центрами тяжести изображения. При оперении внутрь центр тяжести заходит на сам отрезок и расстояние между двумя центрами короче, чем когда оперение наружу, центр тяжести выходит за пределы отрезка и кажущееся расстояние, естественно, больше.

Какие же нейрофизиологические процессы, если не накопление достаточного количества информативных ключевых точек, могут отражать измеряемый порог распознавания при первом предъявлении неполных изображений в Голлин-тесте? Вероятно, мозг оценивает глобальные статистические характеристики изображения.

И. Цуккерман, развивая информационный подход к описанию изображений, дал аналитическую модель работы рецептивных полей нейронов зрительной коры, обеспечивающих расчет глобальных статистических характеристик сцены [Цуккерман, 1978]. Д. Филд довел эту первичную модель до работающих алгоритмов статистического описания работы рецептивных полей первичной зрительной системы как «устройств», обеспечивающих выделение простых первичных признаков, как глобальных, так и локальных [Field, 1994].

Мы сравнили результаты Голлин-теста при локальных поражениях мозга с другими тестами, также основанными на предъявлении фрагментированных образов, но отличающихся от Голлин-теста принципами формирования изображения [Foreman, 1991]. Так, в тесте Попельрейтера [Poppelreuter, 1917; Vokey et al., 1986] изображения перекрывают друг друга; в тесте зрительного «замыкания» Муни [Mooney, 1957] предъявляются части силуэтов лиц (рис. 7.2).

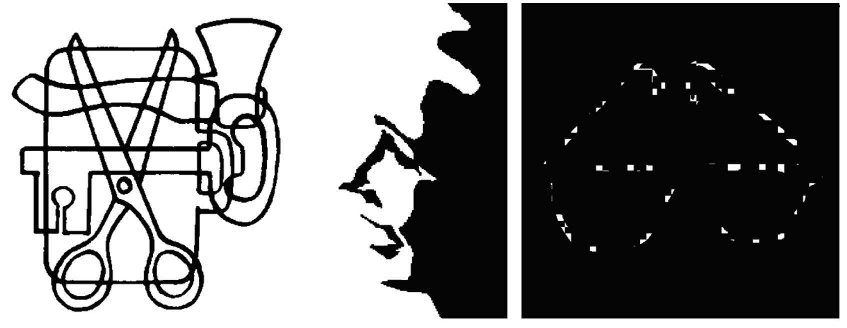


Рис. 7.2. Примеры известных тестов — «зашумленных» изображений (тест Попельрейтера) и неполных изображений (Муни-тест, Голлин-тест)

По данным Н. Форемана, результаты выполнения Голлин-теста при поражениях мозга чаще кореллируют с результатами теста Поппельрейтера, но не с результатами Муни-теста [Foreman, 1991]. Эти данные подтверж-

дают гипотезу, высказанную нами ранее [Шелепин, 2001], согласно которой при выполнении Голлин-теста и Муни-теста включается механизм выделения сигнала из неосознаваемой помехи. В тесте Поппельрейтера взаимно перекрывающиеся фигуры работают как осознаваемые помехи (видимый шум) друг для друга. Спектры сигнала и помехи близки и находятся преимущественно в области средних и высоких пространственных частот. Пространственно-частотный спектр в Муни-тесте является преимущественно низкочастотным, как и сам сигнал. Обработка низкочастотной и высокочастотной информации происходит в разных каналах, реализуемых разными нейронными крупномасштабными сетями. Поэтому и разные поражения головного мозга вызывают симптоматику, связанную с нарушением высокачастотного канала, и симптоматику, связанную с поражением низкочастотного. Близость клинической симптоматики и синхронные нарушения при использовании теста Поппельрейтера и Голлин-теста подтвердили нашу гипотезу о том, что отсутствующие участки контура мозг рассчитывает как статистику их распределения, как и статистику сигнала тестового изображения. Тем самым были заложены предпосылки нового подхода к исследованию неполных изображений как изображений, закрытых «неосознаваемой» маской.

Влияние свойств перекрытия на распознавание и восприятие неполных (перекрытых видимой маской) изображений показывают, что в некоторых случаях явное, видимое перекрытие инициирует механизм зрительного замыкания отдельных фрагментов [Kellman, Spelke, 1983; Rensink, Enns, 1998; Servos et al., 2005]. Перекрытие, которое можно назвать маской, способствует объединению разрозненных фрагментов в один образ с последующим успешным распознаванием. Было выполнено измерение информационно-статистических параметров видимой маскировки при исследовании восприятия фрагментированных фигур [Vokey et al., 1986]. Исследователи удаляли видимые элементы текстуры вокруг фигуры, так что фигура становилась выделяемой из фона, когда достигался пороговый баланс между фигурой (сигнал) и элементами маски (шум). Так был определен эффект распознавания фрагментированных изображений в терминах отношения сигнал/шум.

В наших исследованиях мы сосредоточили усилия на изучении механизмов зрительного восприятия неполных изображений Голлин-теста как задачи выделения сигнала из фона в рамках модели согласованной фильтрации [Красильников, Шелепин, 1996]. Мы представили фрагментированные контурные изображения Голлин-теста как полные контурные изображения, перекрытые маской в местах отсутствия контура. Если цвет маски совпадает с цветом фона изображения фигуры, маску не видно. То есть неполнота фрагментированных изображений Голлин-теста яв-

ляется следствием «неосознаваемой» маскировки. В этом случае пороги, измеряемые в Голлин-тесте, должны быть зависимы от параметров этой «неосознаваемой» маскировки, а зрительная система при распознавании, возможно, обрабатывает статистические параметры фрагментированных Голлин-фигур, которые связаны с параметрами «неосознаваемой» маскировки. Она неосознаваемая, но видимая, так как влияет на пороги распознавания на неосознаваемом уровне.

В большинстве исследований порогов восприятия мы использовали контурные изображения Голлин-теста. Фрагменты выводили на экран с помощью программного окна задаваемого размера. Предварительно полное изображение разбивали на участки, размер которых совпадал с размером программного окна. Участки случайно выбирались в процессе нарастающего формирования контура фигуры на экране. Для увеличения скорости формирования фигуры в общее число выбираемых для предъявления участков изображения включались только участки, содержащие контур фигуры. Голлин-фигура формировалась на экране монитора из фрагментов, размер которых зависел от размера программного окна. Фрагменты появлялись один за другим в случайном порядке с постоянной скоростью — один фрагмент в секунду. Когда испытуемый правильно узнавал фигуру, вывод фрагментов останавливали. Измеряли пороговое значение фрагментации фигуры (доля контура, достаточная для опознания) в абсолютных значениях (суммарное количество пикселей выведенных фрагментов) и в относительных значениях (процент относительно величины полного контура). Оказалось, что значения порогов опознания неполных изображений разных фигур колеблются возле средней величины, составляющей около 15–25 % относительно величины полного контура изображений.

Неполнота фрагментированных фигур Голлин-теста является следствием их перекрытия невидимой для наблюдателя текстуроподобной маской с прозрачными участками (сквозь которые видны фрагменты фигуры) и непрозрачными участками (там, где фрагменты фигуры скрыты). В наших исследованиях это было сделано специально, программным способом, чтобы знать статистические характеристики маски. Мы предположили, что для зрительной системы все неполные изображения содержат невидимую маску независимо от способа их построения. Яркость и цвет непрозрачных участков «невидимой» маски совпадают с яркостью и цветом фона, а размер фрагментов неполной фигуры соответствует размеру прозрачных участков. Восприятие фрагментированных изображений Голлин-теста мы рассматриваем как восприятие в условиях помехи (шума), которое, в свою очередь, представляет один из основных методов исследования зрительной системы. Метод имеет большое значение для клиники, так как позволяет измерять уровень внутреннего шума [Красильников,

Шелепин, 1996; Shelepin et al., 2000]. Этот метод также эффективен для изучения агнозии и амнезии, развития механизмов распознавания в онтогенезе [Corkin, 1982; Ghent, 1956; Warrington, 1962; 1968; 1982]. Итак, мы предполагаем, что восприятие неполных изображений — это выделение (фильтрация) сигнала из помехи.

В свое время И. И. Цуккерманом и его учениками-клиницистами был введен термин «фильтрационная агнозия», связанный с нарушением фильтрационных свойств зрительной системы, которые позволяют выделить сигнал из помехи [Тонконогий, Цуккерман, 1963; Цуккерман, 1968]. Процесс инкрементного пошагового накопления фрагментов контура в Голлинтесте до порогового состояния, то есть увеличение числа отображаемых фрагментов, можно представить как процесс исчезновения «неосознаваемой» маски с соответствующим увеличением вероятности извлечения сигнала из шума.

Если распознавание определяется извлечением сигнала (изображение фигуры) из шума (маска), то можно попытаться определить статистические свойства маски и пороговых фрагментированных изображений. Для этой цели мы использовали пространственно-частотный анализ ввиду его широкого применения для извлечения сигнала из шума и применения при моделировании процессов зрительной обработки [Бондарко и др., 1999; Caelli, 1982; Campbell, Robson, 1968; Ginsburg, 1986; Piotrowski, Campbell, 1982; Pratt, 1982; Field, Brady, 1997].

Было установлено, что для разных фигур Голлин-теста при пороговом уровне фрагментации изменчивость параметров глобального амплитудного пространственно-частотного спектра неполных изображений достоверно меньше, чем вариабельность соответствующих параметров полных изображений и изображений при всего трехпроцентном уровне фрагментации выведенного контура. То есть изображения фигур с пороговым уровнем фрагментации контура характеризуются минимальной внутригрупповой изменчивостью параметров их амплитудно-частотных описаний по сравнению с изображениями допорогового и надпорогового уровней фрагментации [Меркульев и др., 2003; 2004].

Порог распознавания фрагментированных фигур согласуется с принципом наименьшего действия [Шелепин, Красильников, 2003], который прогнозирует минимальную вариабельность спектральных параметров изображений на пороге их распознавания. Действительно, при появлении минимального числа пикселей, достаточного для различения фигур, отличия амплитудных пространственно-частотных спектров минимальны [Krasilnikov et al., 2000].

Следовательно, зрительная система может извлекать свойства маски (шума) из фрагментированного изображения (сигнала с шумом) для после-

дующего извлечения сигнала как текстуры, ограниченной линией контура. Фигура в этих условиях выделяется с помощью согласованной фильтрации, которая удовлетворяет заданным условиям минимизации [Шелепин, Красильников, 2003]. Мы предполагаем, что зрительная система оценивает статистическое распределение невидимых фрагментов, то есть параметры маски, на основании анализа амплитудного спектра видимых фрагментов аналогично распознаванию текстур [Caelli, 1982]. Фазовым спектром при решении задачи маскировки в исследованиях Голлин-теста в ряде случаев можно пренебречь. Наблюдатель пренебрегает информацией о взаимном положении фрагментов контура, но положение фрагментов на линии контура для него существенно.

Еще раз подчеркнем, что неполнота фигур рассматривается как результат маскировки, то есть отсутствие элементов контура фрагментированной фигуры — это результат влияния «невидимой» (неосознаваемой) маски. Фигура как бы частично перекрыта маской, имеющей определенные как статистические, так и пространственно-частотные параметры. Хотя эта маска «невидимая», но для первичных этапов обработки зрительной информации она реальна и имеет свойства мультипликативного шума. Она фильтруется первичными звеньями зрительной системы и не осознается в высших звеньях. Поэтому мы называем ее неосознанной маской. Неполные фигуры Голлин-теста были промоделированы как фигуры, перекрытые маской со случайно расположенными прозрачными и непроницаемыми участками. Мы установили статистические характеристики контурного изображения и шумовой маски в результате их обработки в пространственной и пространственно-частотной области.

Это положение подкрепляют наши исследования с использованием новой методики, отличающейся от Голлин-теста. В условиях вынужденного выбора мы провели измерения распознавания неполных изображений, полученных с помощью наложения неосознаваемой маски с упорядоченными параметрами (рис. 7.3), а не случайными, как в Голлин-тесте. Степень и характер упорядочивания неосознаваемой маски изменяет пороги восприятия. Результаты исследований показали, что распознавание ухудшается при увеличении длин участков контура и промежутков между ними при сохранении одинакового уровня заполнения контура. Пример упорядоченной неосознаваемой маски — решетки, цвет которой совпадает с фоном, приведен на рис. 7.3.

Проведенные нами многочисленные исследования подтверждают наше предположение, согласно которому при восприятии фрагментированных фигур Голлин-теста в зрительной системе работают механизмы фильтрации сигнала из шума. Но как они работают?

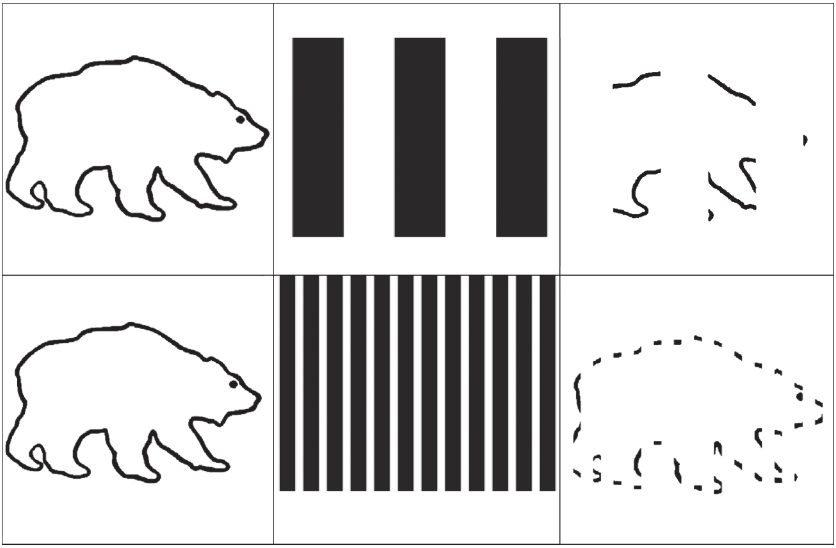


Рис. 7.3. Формирование неполных изображений с помощью упорядоченных неосознаваемых масок — решеток с разной пространственной частотой

7.3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ, ЛОКАЛЬНЫЙ И ГЛОБАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Проблему объединения фрагментированного изображения в целостный образ в рамках пространственно-частотного подхода, казалось, можно решить на основании низкочастотной фильтрации. Еще в начале 1970-х годов А. Гинзбург высказал предположение, что зрительная система человека объединяет разрозненные фрагменты в одно целое (в гештальт) с помощью низкочастотной фильтрации [Ginsburg, 1975; Ginsburg, Evans, 1979]. При низкочастотной фильтрации исходного изображения, представляющего собой набор фрагментов (однотонных квадратиков), сгруппированных в пространстве в виде буквы со сложным спектральным составом, низкочастотная составляющая спектра является тем связующим звеном, которое зрительная система использует для объединения этих фрагментов в целостное изображение буквы. А. Гинзбург полагал, что любое объединение фрагментов в одно целое можно объяснить только низкочастотной фильтрацией. Эта модель показалась чрезвычайно привлека-

тельной. Она действительно объяснила многие явления восприятия и дала практические рекомендации по восстановлению изображений. Модель низкочастотной фильтрации была использована Гинзбургом и для описания иллюзии Мюллера-Лайера. Некоторые последующие модификации, пытавшиеся опревергнуть эту гипотезу, только подтвердили ее.

Алгоритмы, напоминающие модель А. Гинзбурга, успешно используют при поиске изображений в базах данных. Так как во многих случаях сложно составить адекватное словесное описание изображения, для поиска в таких базах используется образец в виде грубого наброска или какого-либо другого изображения, похожего на искомое. Набросок обладает лишь приблизительным сходством с целевым изображением — в нем отсуствуют многие детали, а пропорции могут быть искажены. Поэтому поиск путем прямого сравнения образца с изображениями, хранящимися в базе, невозможен. Вместо этого образец подвергается вейвлет-преобразованию, в результате которого вычисляется набор числовых коэффициентов, описывающих изображение на различных масштабных уровнях и в различных пространственно-частотных диапазонах (так называемое пирамидное представление). Группа коэффициентов, соответствующих низкочастотному диапазону, описывает крупномасштабные детали изображения. Именно эти коэффициенты, содержащие наиболее существенную информацию об изображениях, и используются для формирования запроса к базе данных. Естественно, аналогичные наборы коэффициентов предварительно вычисляются и для всех изображений, хранящихся в базе. Этот метод оказался эффективным даже в случае весьма схематичных набросков, содержащих лишь небольшую часть информации о тестовом изображении [Jacobs, 1995].

Однако использование низкочастотной пространственной фильтрации отражает лишь часть проблемы и не может объяснить все режимы работы зрительной системы. Накапливающиеся экспериментальные данные позволили усомниться в такой простой трактовке механизма объединения фрагментов изображения. Еще в 1980-е годы мы изучили влияние пространственно-частотной фильтрации фрагментированных букв [Павлов и др., 1989]. Особенность нашего подхода заключалась в том, что мы применили различную фильтрацию фрагментированных букв: широкополосную и полосовую — высокочастотную и низкочастотную. Оценивали способность наблюдателя объединять разрозненные фрагменты дискретного изображения в целостный образ — в гештальт (рис. 7.4). Был выбран узкий класс тестовых изображений в виде фрагментированных символов:



Тесты были синтезированы на ЭВМ с полутоновым дисплеем в пределах матрицы 12 × 12 фрагментов построения матрицы. Каждый из этих



Рис. 7.4. Примеры фрагментированных символов ∃ Ш ⫪ Е. После фрагментации и высокочастотной фильтрации (слева), низкочастотной (в центре) фильтрациии исходного нефильтрованного, но фрагментированного символа

фрагментов, в свою очередь, также строился из матрицы размерностью 12 × 12 точек (пикселей дисплея), причем каждый пиксель мог принимать значения яркости относительно среднего уровня в диапазоне от +8 до –8 условных единиц. Были использованы стимулы, представляющие графически одну и ту же букву Ш, но повернутую в четырех разных ориентациях. Испытуемый должен был называть их как разные буквы алфавита в соответствии с ориентацией.

Использовали фрагменты трех типов. Фрагменты первого типа представляли собой небольшие прямоугольники с постоянной в пределах фрагмента яркостью и имели широкий спектр, содержащий как низкочастотную, так и высокочастотную составляющие. Фрагменты второго типа имели яркостной профиль в форме полуволны синусоиды, их спектр концентрировался в низкочастотной области. И наконец, фрагменты третьего типа представляли собой комбинацию из вложенных друг в друга темных и светлых квадратов, причем усредненная яркость такого фрагмента была равна яркости фона (рис. 7.4). Спектр этого типа фрагментов лежал в области высоких пространственных частот. Изменяя расстояние от испытуемого до дисплея, можно было плавно изменять угловой размер тестовых изображений и соответственно их спектр, смещая его в высокочастотную или низкочастотную области.

Предъявляли оптотипы с различными уровнями фрагментации. Пределы фрагментации были таковы, что при максимальном числе фрагменты сливались в непрерывные линии, а при минимальном числе фрагментов буква распадалась. Получена психометрическая функция, отражающая процент ошибок в зависимости от количества фрагментов разбиения их формы, разной удаленности от дисплея и контраста.

При малых угловых размерах оптотипа наименьший процент ошибок у наблюдателя был тогда, когда фрагменты были прямоугольной формы, а фильтрация в высокочастотном и низкочастотном диапазоне ухудшала различение. Этот результат можно было предсказать; изображение, построенное из прямоугольных полных фрагментов, содержит максимальную спектральную энергию сигнала. При малых угловых размерах распознавание очень сильно зависит от энергии сигнала.

Результаты измерений при малых расстояниях между наблюдателем и дисплеем, когда угловые размеры дисплея и тестовых букв и их фрагментов были велики, при исследовании возможности распознавания букв, составленных из фрагментов с высокочастотным профилем, не содержащих низких пространственных частот, оказались нетривиальными. Тестовые изображения, составленные из черно-белого края на сером фоне, получили в дальнейшем название «исчезающие» оптотипы.

Сама возможность восприятия целостного изображения при наблюдении «исчезающих» фрагментов позволяет утверждать, что объединение фрагментов в одно целое в таких условиях наблюдения осуществляется без низкочастотной составляющей в спектре изображения. Объединение, вероятно, осуществляется методом построения огибающей функции, которая в этом случае строится на основе предварительного выделения высокочастотных фрагментов изображения, а не на основании выделения низкочастотных составляющих, присутствующих в спектре самого изображения.

Информация о краях фрагмента должна была согласована с весовой функцией рецептивного поля для оптимального выделения некоего фрагмента изображения. Нейрофизиологическим коррелятом пространственного элемента разбиения в зрительной системе являются рецептивные поля. Фрагменты с высокочастотным профилем имеют большую ориентационную чувствительность, чем низкочастотные, и это обеспечивает более выраженные корреляционные связи между рецептивными полями с одной ориентацией.

Гипотеза А. Гинзбурга о первичной роли низкочастотных компонентов в исходном изображении, влияющих на способность объединять фрагменты изображения в образ, вероятно, справедлива при малых размерах фрагментов и изображений, в естественных условиях наблюдения. При больших фрагментах зрительная система может использовать и другие признаки. В частности, существенными являются ориентационные составляющие фрагментов, что в дальнейшем было подтверждено неоднократно как в лаборатории Д. Филда, так и в наших исследованиях. Результаты наших исследований механизмов восприятия с предъявлением неполных изображений с упорядоченными параметрами показали, что высокочастотные компоненты (или мелкие детали) важны для правильного распознавания изображений, но

ошибки опознания определяются схожестью низкочастотного содержимого спектров различных неполных изображений.

Таким образом, пространственно-частотный подход позволяет утверждать, что пороги восприятия зависят от степени фрагментации, спектрального состава фрагмента и угловых размеров тестов. При больших размерах тестов опознаются лучше те, которые образованы из фрагментов с выраженной ориентационной составляющей. Показана роль предварительной высокочастотной фильтрации, которая обеспечивает четкую ориентационную направленность фрагментов и тем самым облегчает их связывание. Низкочастотная фильтрация также облегчает слияние, но преимущественно при малых угловых размерах тестовых изображений. Пространственно-частотная фильтрация определяет работу лишь первичных каскадов обработки информации. Она не может объяснить сам процесс узнавания и фрагментированного изображения. Для этого необходимо привлечение модели согласованной фильтрации.

При повторных предъявлениях все более возрастает роль информативных признаков, по которым можно опознать весь объект. Выделение признаков работает в основном при восприятии выученного алфавита. Именно обучение данному алфавиту стимулов и соответственно алфавиту специфических для данного набора изображений признаков позволяет по малому числу признаков распознавать неполный объект.

Пороги распознавания при первом предъявлении изображений, по данным разных авторов, составляют от 15 до 25 % величины контура, которую необходимо предъявить, чтобы наблюдатель мысленно восстановил изображение. Обучение алфавиту чрезвычайно важно. Исследования показывают, что после двух-четырех повторений измерений с данным набором контурных изображений фрагментированное изображение из данного набора может быть идентифицировано при предъявлении всего лишь нескольких фрагментов контура, составляющих в сумме 3–4 % его величины. Повторение Голлин-теста приводит к быстрому уменьшению значений порогов распознавания, вероятно, вследствие неявного обучения и памяти [Foreman, 1991; Foreman, Hemmings, 1987].

Были проведены работы по исследованию влияния на пороги распознавания эффекта «знакомства» со стимулами и маской путем их повторения в серии последовательных опытов. «Знакомство» с маской обеспечивал алгоритм программы с использованием в разных опытах «окна» маски одинакового размера. Повторное предъявление «знакомых» фигур привело к значительному снижению порогов. Снижение порогов происходило и при предъявлении «незнакомых» фигур, но со «знакомой» маской. Снижение порогов узнавания указывает на оптимизацию механизма выделения фигуры из шума.

Зрительная система «извлекает» фигуру из «невидимой» маски, определяя статистические свойства маски как типичной текстуры, определяя размер и вероятность появления элементов «невидимой» маски. Возможно, что это совершается через определение среднего размера наблюдаемых элементов и оценку средней дистанции между ними. В процессе обучения испытуемый знакомится со статистическими свойствами «невидимой» маски, и это облегчает восприятие. Данный способ зрительная система использует тогда, когда каждое новое предъявление одной и той же фигуры имеет независимое случайное распределение последовательно выводимых фрагментов.

Это не единственный механизм уменьшения порогов восприятия. Если алгоритм вывода фрагментов квазислучаен, то есть повторяется одна и та же реализация случайной последовательности выведения фрагментов, то возможно обучение другого типа, например по характерному положению отдельных фрагментов или по сочетанию характерных локальных специфических признаков. В процессе обучения, когда испытуемый знакомится с алфавитом стимулов, одинаково большое значение для успешного распознавания принимают и целостная форма объекта, и локальные информативные признаки, и статистика маски. Поскольку наблюдатель может распознать изображение при предъявлении всего 5 % величины контура, а иногда и 1 % этой величины, это означает, что испытуемый использует какие-то отдельные характерные локальные признаки в изображении, причем иногда эти признаки (на основании опроса испытуемых) оказываются у разных испытуемых различными.

7.4. РОЛЬ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОСТРОЕНИИ ЦЕЛОСТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Как же создается целостное изображение в мозгу? Зрительная система человека при первом предъявлении стимула оценивает глобальную статистическую информацию в изображении, которая может быть описана амплитудным спектром «невидимой» маски. Это оптимизирует механизм выделения сигнала из шума в качестве первичной фильтрации для последующего выполнения согласованной фильтрации в соответствии с предложенной ранее моделью обработки информации в зрительной системе [Красильников, Шелепин, 1997]. При первом предъявлении алфавита незнакомых изображений объектов наблюдатель воспринимает фрагментированные изображения как целые, но замаскированные объекты. Фрагментированная фигура извлекается из шума, а затем в зрительной системе происходит сравнение с внутренним обобщенным шаблоном этого объек-

та. Согласно развиваемым нами представлениям, вначале при не выученном алфавите тестов роль специфических признаков невелика. Для каждого последующего предъявления они становятся более важными. Первое же предъявление стимула запускает механизм обучения. Происходит выработка шаблона конкретного изображения данного объекта. Обучение, вероятно, отражает процесс сохранения специфических признаков и дальнейшего согласования с ними процесса восприятия.

В процессе обучения зрительная система использует на разных этапах обработки сигнала как простые, так и специфические признаки. В модели согласованной фильтрации отображаемые фрагменты накладываются на выработанный в процессе обучения шаблон целостной фигуры, в результате происходит распознавание объекта.

Поэтому изучение восприятия неполных изображений, и особенно Голлин-тест, имеют большое практическое значение в информационных технологиях для создания эффективных алгоритмов распознавания аэрофотоснимков, идентификации лиц в толпе, в обработке медицинских изображений и рукописных текстов. В клинической нейропсихологии исследование механизмов объединения разрозненных фрагментов в одно целое необходимо как для понимания процессов восприятия, обеспечивающих правильную идентификацию фигур, так и для локализации пораженных механизмов у больных с некоторыми формами агнозии. В клинических исследованиях способность правильно воспринимать и идентифицировать зашумленные, фрагментированные изображения используют давно для изучения онтогенеза зрительной системы, для исследования нарушений памяти у больных с амнезией, для измерения изменений зрительного восприятия в результате локальных поражений мозга. В когнитивной и экспериментальной психологии этот метод используется для изучения перцептуального развития у представителей различных культур, для установления алгоритмов распознавания формы, для исследования зрительной памяти.

Голлин-тест удобен для решения клинических проблем дифференциальной диагностики когнитивных нарушений, так как позволяет исследовать механизмы распознавания, выделения фигуры из фона, обучение и скорость обучения при повторных предъявлениях. В когнитивной психологии трудно найти еще один такой тест, который позволяет столь удобно исследовать разные механизмы восприятия и памяти.

В данной главе мы рассмотрели два подхода к изучению механизмов восприятия фрагментированных фигур — выделение признаков высшего порядка в изображении и определение общих статистических свойств изображения для выделения гештальта. Второй подход подкреплен моделью согласованной фильтрации. Эти два подхода надо считать не конкурентными, а взаимодополняющими. Задача и сложность изображения определяют принятие наблюдателем решения об изображении либо по отдельным специ-

фическим для данного изображения признакам высшего порядка, либо по целостной статистической структуре. Показано, что зрительная система выделяет глобальные статистические свойства целостного изображения. Информативные локальные признаки высшего порядка мозг использует как дополнительный источник информации. При обучении данному алфавиту стимулов роль этого источника резко возрастает. Поэтому при первом предъявлении незнакомого набора изображений пороги фрагментации составляют около 15–30 % предъявленного контура неполной контурной фигуры. После обучения порог снижается до 5 % контура. В этих условиях распознавание возможно только на основании локальных информативных признаков.

В соответствии с моделью согласованной фильтрации, обеспечивающей распознавание фрагментированных изображений, в Голлин-тесте фрагментированное изображение объекта воспринимается как целостная структура, сравниваемая с шаблоном, который хранится в памяти и выбирается с помощью механизма избирательного внимания.

При первом знакомстве с алфавитом стимулов работают механизмы восприятия целостного образа, гештальта. В этих условиях зрительная система на первом этапе рассчитывает статистические характеристики изображений. Полосовая фильтрация в этих условиях оптимизирует отношение сигнал/шум. Затем происходит согласованная фильтрация. На заключительном этапе наступают принятие решения и двигательный ответ. Выделение информативных специфических локальных признаков высшего порядка может включаться в основном при восприятии хорошо выученного алфавита.

Статистика маски в Голлин-тесте, заложенная программным образом, действительно распознается наблюдателем. Следовательно, зрительная система может фильтровать не только видимую маску, но и «невидимую». Так как «невидимая» маска выделяется и обрабатывается зрительной системой, то ее целесообразно называть маской «неосознаваемой». Последний вывод очень важен для понимания когнитивных нарушений, при которых происходит нарушение фильтрационных свойств на разных уровнях зрительного анализатора.

Где в зрительной системе происходит опознание фрагментированных изображений? Была показана роль престриарной коры в глобальном, целостном описании [Braddick et al., 2006; Braddick, Atkinson, 2007]. Показано развитие механизмов престриарной коры в онтогенезе. Результаты этих работ соответствуют нашим старым исследованиям по локализации обобщенного глобального инвариантного описания изображений в мозгу хищников [Шелепин, 1973; 1984], а также нашим работам по локализации глобального описания матриц 10 × 10 элементов Габора [Фокин и др., 2007] и построения вероятнов в результате «инсайта» целостного образа фрагментированных фигур Голлин-теста в престриарной коре [Шелепин и др., 2015 а; 2015 б].

ГЛАВА 8

ИНВАРИАНТНОСТЬ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

8.1. ИНВАРИАНТНОСТЬ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА

Восприятие и мышление во многом базируются на возможности мозга находить в окружающем мире инвариантные характеристики. Зрительному восприятию присуща фундаментальная инвариантность к масштабным преобразованиям — к освещенности, к повороту и т. д. Возможность восприятия индивидуальных особенностей изображений наблюдаемого объекта сочетается со способностью инвариантного восприятия при изменении освещенности объекта, изменении его размера, ориентации, разворота по осям и ракурса. Использование инвариантных характеристик — это важнейшее свойство интеллекта [Bohm, 1967]. Способность к инвариантному опознанию у живых организмов возникает на относительно ранних стадиях онто- и филогенеза [Sutherland, 1960; 1968; 1979; Fraisse, Piaget, 1978]. До недавнего времени использовалось простое допущение, согласно которому информация о существенных свойствах изображения объекта, определяющих его принадлежность к определенному классу и не зависящих от размера и ориентации изображения этого объекта, активирует один и тот же нейронный ансамбль, вызывая один и тот же отклик на «выходе» зрительной системы, представляет собой «код зрительного образа» [Hebb, 1949; 1959 a; 1959 b].

Психофизические исследования инвариантности распознавания человеком объектов были связаны с началом создания искусственных распознающих систем [Глезер, Цуккерман 1961; Глезер и др., 1975; Sutherland, 1960; 1968; 1979; Шелепин, 1972; 1973]. Именно решение практических задач потребовало проведения измерений количества информации, которое зрительная система способна обработать за определенный промежуток времени. Было показано, что количество информации за счет увеличения числа изображений в алфавите приводит к возрастанию времени опознания, однако увеличение числа стимулов в алфавите за счет варьирования их размера или ориентации не меняет этого времени, так как преобразования подобия не изменяют величину алфавита стимулов (Стефанова, 1964; 1970; Stefanova, 1974).

В повседневной жизни мы наблюдаем и узнаем изображения объектов не только разного размера, но и при разных углах наблюдения. Широкую известность получила гипотеза, согласно которой на этапе обучения зрительная система по двумерным проекциям предъявляемых на сетчатку глаз объектов строит в мозге наблюдателя представления трехмерных объектов, которые и запоминает как шаблоны [Marr, 1987]. При распознавании трехмерных объектов информация, содержащаяся в их двумерных проекциях на сетчатку глаз, используется для сравнения с хранящимися в памяти наблюдателя представлениями трехмерных объектов, сформированными на этапе обучения. Сложность зрительной задачи усугубляется тем, что вследствие варьирования угла наблюдения, масштаба, освещенности объекта его проекции на сетчатку глаз составляют множество различающихся между собой двумерных изображений.

В связи с этим представляет существенный интерес исследование диапазонов инвариантного восприятия, то есть диапазонов для различных параметров изображений объектов (угловых размеров, углов разворота и т. п.), при которых количественные характеристики процесса их восприятия остаются неизменными. В частности, отсутствие данных о диапазоне инвариантности зрительной системы человека к различным преобразованиям вынуждает инженеров задавать заведомо избыточные параметры для искусственных распознающих систем.

В качестве меры оценки инвариантного восприятия мы рассмотрим пороги распознавания неполных изображений. Были проведены количественные измерения порогов распознавания, позволяющие предположить наличие механизмов, обеспечивающих инвариантное распознавание неполных двумерных изображений трехмерных объектов при изменениях масштаба и поворотах.

Метод измерения порогов распознавания фрагментированных изображений был предложен Е. С. Голлином в 1960 году [Gollin, 1960] и под его

именем вошел в практику нейропсихологии. Мы применяли компьютеризированную версию Голлин-теста, предложенную Н. Форeманом [Foreman, 1991; Foreman, Hemmimgs, 1987] и модернизированную С. В. Прониным [Вахрамеева и др., 2008; Чихман и др., 2011; Шелепин и др., 1985].

8.2. ИНВАРИАНТНОСТЬ ВОСПРИЯТИЯ К ПРЕОБРАЗОВАНИЯМ МАСШТАБА И ПОВОРОТА

Был подобран набор из семидесяти пяти контурных изображений общеизвестных объектов. В процессе измерений программа разбивает исходные контурные изображения на фрагменты заданного размера, которые выводятся в случайном порядке на экран монитора, постепенно формируя полный контур объекта. На рис. 8.1 показан принцип формирования неполных изображений при случайном предъявлении фрагментов. Число случайно расположенных в маске окон в процессе предъявления стимула нарастает. На рис. 8.1 показано конечное число фрагментов в определенный момент времени. Перед испытуемым ставили задачу как можно быстрее распознать предъявляемый стимул.



Рис. 8.1. Принцип формирования фрагментированных тестовых изображений. Слева — исходный объект; в центре — маска с переменной статистикой (плотностью окон, через которые наблюдатель видит исходный объект); справа — видимое изображение при заданной плотности распределения окон

В маске белым цветом изображены прозрачные окна, черным — непрозрачные. При наложении маски на изображение наблюдатель видит белый цвет или на экране дисплея — светящиеся фрагменты только в тех окошках, за которыми имеется изображение исходного объекта. Допускаем, что неосознанно наблюдатель оценивает статистику маски и ее вычи-

тает. Ответ при правильном распознавании объекта фиксирует пороговую суммарную площадь этих фрагментов (в % от полной площади контура). Величину порога (*Thr*) вычисляли по формуле:

$$\boldsymbol{Thr = (Vfr/Vtot) \times 100\%},$$

где *Vfr* — число пикселей контура, при котором произошло узнавание, а *Vtot* — число пикселей в полном контуре объекта.

Были проведены серии измерений. В первой испытуемые не были знакомы с алфавитом стимулов, а во второй знакомы. Первая серия состояла из двух частей, которые отличались способом предъявления стимулов: с помощью проекции изображений на экран и с помощью электронно-лучевого дисплея. К обработке приняли данные, полученные на двадцати двух испытуемых в возрасте 18–25 лет. Все испытуемые обладали остротой зрения от 1,0 до 2,0. Угловые размеры изображений, пороги распознавания которых мы изучали, составляли 0,19; 0,35; 0,71; 1,44; 13; 25 и 50 угл. град. Изображения и их фрагменты не выходили за пределы разрешающей способности зрительной системы испытуемых. Изображения предъявляли на экране размером 2,5 × 3 м с помощью мультимедийного проектора (BENQ MP720p), разрешение 1152 × 864, частота обновления кадра 74 Гц. Измерения проводили в помещении длиной 20 м. Равномерное слабое освещение (10 св / м^2) создавала только люминесцентная лампа вне поля зрения на высоте 3,5 м. Угловой размер изображений варьировали следующим образом: проектор располагался на расстоянии 60 см от экрана, испытуемый садился перед экраном на разных расстояниях, начиная с 15,5 м и заканчивая 2 м. Размер изображения на экране при этом не менялся. Таким способом получали размеры изображений в диапазоне от 0,19 до 1,44 угл. град. Затем стойку с проектором передвигали на расстояние 12,3 м от экрана. Испытуемый располагался перед экраном на разных расстояниях, начиная с 5 м и заканчивая 70 см. Этим способом получали угловые размеры изображений от 1,44 до 50 угл. град.

Изменения яркости изображения при удалении проектора от экрана не оказывали существенного влияния на пороги распознавания, так как яркость оставалась в том диапазоне значений, при которых пороги распознавания изменяются мало [van Nes, Bouman, 1967]. В добавочной серии исследований для измерений значений порогов при малых размерах изображений мы предъявляли стимулы на дисплее высокого разрешения (17 Professional Sony Trinitron G200 PST).

Во второй серии измерений работали с опытными (обученными) испытуемыми, знакомыми с задачей и набором стимулов. Условия проведения исследований (диапазон размеров, освещение) были такими же, как и в первой серии измерений с неопытными испытуемыми. С обученными

испытуемыми мы провели несколько опытов, которые отличались друг от друга последовательностью предъявления стимулов разного размера. Это было сделано для того, чтобы проверить, будет ли меняться зависимость порогов восприятия неполных изображений от масштаба стимула, если стимулы разного размера будут предъявляться в различной последовательности [Вахрамеева и др., 2008].

В третьей серии исследований для измерения порогов распознавания фрагментированных двумерных изображений трехмерных объектов при различных разворотах была реализована новая методика, представляющая собой еще одну модификацию Голлин-теста [Чихман и др., 2011]. Для генерации изображений-стимулов были использованы двумерные изображения-прототипы шести известных трехмерных объектов — «пчела», «парусник», «стул», «свинья», «чайник» и «водопроводный кран». Для синтеза изображений-стимулов Голлин-теста подбирали объекты, хорошо знакомые большинству людей в их повседневной жизни. При создании двумерных изображений-стимулов использовали параллельную, а не перспективную проекцию, чтобы исключить перспективные искажения изображений при поворотах (ракурс). При повороте размер изображения не меняли. Для каждого объекта синтезировали подмножество двумерных изображений, начиная с прототипа. В качестве прототипа был выбран вид в профиль (сбоку). Для каждого объекта было создано два ряда изображений. Первый ряд включал последовательность двумерных изображений объекта после поворота на 15° вокруг оси Y по направлению к наблюдателю (от 0 до 60°). Второй ряд состоял из двумерных изображений объекта после поворота каждый раз на 15° одновременно вокруг двух осей — Y и X. Имя файла соответствующего изображения включало имя объекта, величину поворота в градусах вокруг оси Y и X.

Линии, составляющие контурное двумерное изображение трехмерного объекта, в соответствии с методикой Голлин-теста формировались на экране дисплея в режиме прогрессивного накопления путем случайного добавления блоков пикселей. Предварительно изображения bitmap-формата, полученные с помощью 3D Studio, разбивались специальной программой на блоки 4 × 4 пикселя. Блоки в процессе выполнения программы измерения выбирались случайно и выводились на экран дисплея в режиме накопления. На рис. 8.2 показаны примеры фрагментированных двумерных изображений трехмерных объектов с разных точек наблюдения. При формировании двумерных изображений в нашем случае был использован прием антиэлайзинга, то есть использование пикселей с градацией серого при прорисовке кривых, что позволяет добиться уменьшения эффекта ступенчатости на их краях.

Программа предъявления после старта начинает вывод в режиме накопления фрагментов первого случайно выбранного изображения последо-

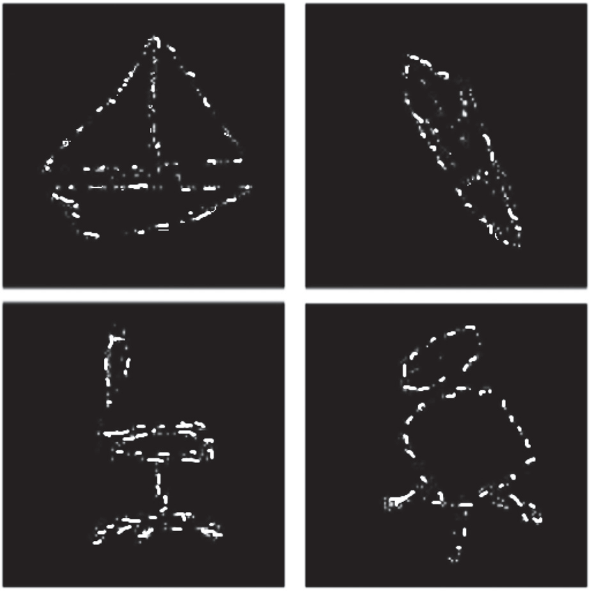


Рис. 8.2. Тестовые фрагментированные изображения при разном повороте (по одной оси) и развороте по двум осям [Чихман и др., 2011]

вательности. После того как испытуемый правильно идентифицирует изображение, накопление фрагментов останавливается и фиксируется количество пикселей в выведенных фрагментах, а также время формирования изображения до момента узнавания. Темп вывода фрагментов для формирования полного контура изображения задается перед началом измерений. Время формирования полного изображения составляло 120 сек.

Испытуемые первой серии, не знающие данного набора стимулов, были организованы в две группы по пять человек в каждой. Измерения с каждой группой проводили многократно, пять раз с интервалом в один день. Первая группа испытуемых наблюдала изображения объектов в каждом измерении в одном и том же ракурсе, то есть без поворота трехмерного объекта. Вторая группа испытуемых в одной серии опытов наблюдала изображения объектов в каждом последующем опыте с поворотом трехмерных объектов вокруг оси Y на 15°, во второй серии — с поворотом на 15° одновременно вокруг двух осей — Y и X. То есть в течение серии опытов предъявляли двумерные изображения, имитирующие поворот трехмерного объекта от 0 до 60°. Каждое изображение в одном опыте предъявляли в случай-

ном порядке три раза. Изображения предъявляли на мониторе Mitsubishi Diamondtron 230 с разрешением 1024 × 768, частотой вертикальной развертки 100 Гц. Расстояние наблюдения — 1,2 м.

Все испытуемые, принимавшие участие в нашем исследовании, обладали нормальным или скорректированным до нормы зрением. Острота зрения, измеренная по стандартной методике с использованием колец Ландольта, у всех испытуемых была не меньше единицы.

Пороги восприятия неполных изображений анализировали как функцию от размера изображения. В этой серии измерений каждое изображение было предъявлено испытуемому только один раз. Зависимость, представленная на рис. 8.3, построена на основании усредненных данных по всем испытуемым. Для дальнейшей обработки результаты были поделены в соответствии с остротой зрения испытуемых на три группы. В первую группу попали результаты, полученные на испытуемых с остротой зрения 1,0–1,4, во вторую группу — испытуемых с остротой зрения 1,4–1,7, в третью группу — с остротой зрения 1,7–2,0.

Распределение данных в группах не соответствовали нормальному, поэтому использовали непараметрические критерии Вилкоксона и Крускал-Валли. Оба критерия позволяют сравнивать медианы групп. Критерий Вилкоксона позволяет сравнивать медианы двух групп; анализ Крускал-Валли является непараметрическим аналогом ANOVA и позволяет сравнивать медианы трех и более независимых выборок. Нулевая гипотеза для обоих критериев: все выборки взяты из одной генеральной совокупности. Альтернативная гипотеза: хотя бы одна из медиан отличается от остальных.

Последовательно сравнили медианы порогов восприятия изображений близких размеров, например 50 и 25, 25 и 13, 13 и 1,44 и т. д. Для этого использовали критерий Вилкоксона. Чтобы выяснить, существуют ли области размеров, в которых пороги восприятия неполных изображений не меняются, применяли анализ Крускал-Валли. Нулевая гипотеза принималась при $p > 0{,}05$.

Таким образом, для каждой из трех групп испытуемых были получены диапазоны размеров изображений, в пределах которых медианы порогов восприятия неполных изображений не менялись. В группе испытуемых с остротой зрения 1,0–1,4 значение медианы оказалось одинаковым при размерах стимулов 13–50 угл. град. ($p = 0{,}4469$). В группе испытуемых с остротой зрения 1,4–1,7 медианы порогов восприятия неполных изображений не отличались при размерах стимулов 13–25 угл. град. ($p = 0{,}4517$) или 1,44–25 ($p = 0{,}0186$); и наконец в группе с остротой зрения 1,7–2,0 медианы оказались одинаковыми при размерах стимулов 1,44–13 угл. град. ($p = 0{,}7036$) или 1,44–25 ($p = 0{,}0314$).

В специальной (уточняющей) серии исследований с дробным изменением малых размеров стимулов и в меньшем диапазоне масштабов (0,19–13 угл. град.) стимулы предъявляли на электронно-лучевом дисплее (17 Professional Sony Trinitron G200 PST). В этой работе нам удалось показать, что при малых размерах стимулов (0,19 и 0,35 угл. град.) острота зрения влияет на пороги восприятия неполных изображений. Испытуемым с более высокой остротой зрения требовалось меньшее количество фрагментов контура для его распознавания.

При малых размерах стимулов резко увеличивается количество изображений, не распознанных даже при предъявлении нефрагментированного контура объекта. О. Вахрамеевой введен параметр (коэффициент), учитывающий количество нераспознанных изображений: это отношение количества нераспознанных изображений к общему числу предъявленных изображений одного размера, выраженное в процентах. Этот коэффициент равен нулю или принимает очень низкое значение при средних и больших размерах стимула. Однако при размере стимула 0,19 угл. град., то есть меньшем, чем размер центральной области фовеолы, коэффициент увеличивается.

У людей с более низкой остротой зрения таких нераспознанных изображений по критерию Вилкоксона достоверно больше, чем у людей с самой высокой остротой зрения, причем это наблюдается как при размере стимула 0,19 угл. град. ($\alpha = 0{,}01$), так и при размере стимула 0,35 угл. град. ($\alpha = 0{,}05$).

Во второй серии измерений изучали влияние знакомства испытуемого с алфавитом стимулов (опытные испытуемые) на пороги восприятия. Результаты этой серии измерений представлены на рис. 8.3. На рисунке отдельно представлены зависимости порогов восприятия неполных изображений от размеров стимулов для каждого из испытуемых. С каждым из двух испытуемых было проведено три блока измерений. Зависимости, полученные в результате проведения каждого блока измерений для одного испытуемого, представлены на одном графике. Напомним, что блоки измерений отличались между собой последовательностью предъявления групп стимулов определенного размера.

В целом пороги узнавания неполных изображений у опытных испытуемых ниже, чем у неопытных. Ранее было показано, что при обучении пороги восприятия неполных изображений снижаются, а в определенный момент значения порогов выходят на плато и их величина уже не меняется [Foreman, Hemmings, 1987; Foreman, 1991]. Форма кривой зависимости порога распознавания неполных изображений от числа повторений каждого изображения характерна для здоровых испытуемых всех возрастов. Изменяется ее абсолютное значение. Поэтому и форма кривых, представленных рис. 8.5, аналогична форме кривой зависимости порогов восприятия непол-

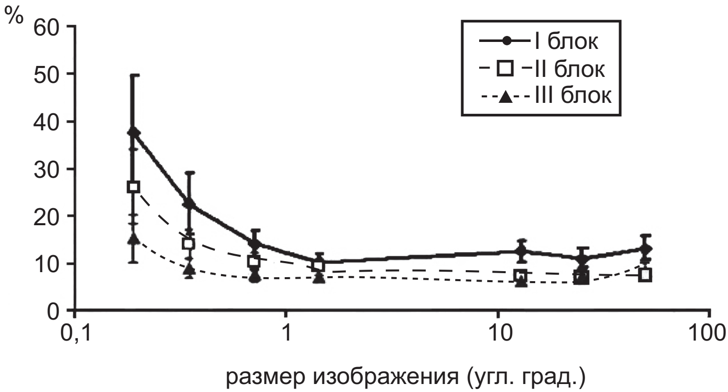


Рис. 8.3. Зависимость порогов восприятия неполных изображений от размера изображения (стимула). Стимулы предъявляли на экран с помощью цифрового видеопроектора. На графике указаны средние значения порогов восприятия со стандартными отклонениями. По оси абсцисс — размер стимула; по оси ординат — процент правильных ответов [Вахрамеева и др., 2008]

ных изображений от размеров стимулов, полученной при анализе данных от неопытных испытуемых. То есть, как и в первой серии, имеется область размеров стимулов, при которых медианы порогов не меняются с изменением размера, а за пределами этой области пороги восприятия неполных изображений возрастают. Абсолютные значения порогов у опытных наблюдателей по сравнению с неопытными испытуемыми меньше.

Для сравнения групп полученных данных мы снова применили критерий Вилкоксона, а для определения интервала размеров изображений, в котором пороги восприятия неполных изображений не меняются, использовался анализ Крускал-Валли.

Пороги восприятия неполных изображений у испытуемых в первом блоке измерений были достоверно выше, чем в последующих блоках, при всех размерах стимула, за небольшим исключением. При этом размере пороги восприятия в третьем блоке были достоверно ниже, чем в первом и втором блоках. Значения этих порогов между собой не различались ($\alpha = 0{,}01$, критерий Вилкоксона). При размерах стимулов 13, 25 и 50 угл. град. пороги восприятия во втором и третьем блоках не различались и были достоверно ниже, чем в первом блоке измерений.

Таким образом, несмотря на то что испытуемые уже имели опыт в выполнении данной задачи, от первого к третьему блоку происходило снижение порогов восприятия. Имеющиеся незначительные различия между испытуемыми были достоверны только в первом блоке измерений (подробно результаты этих измерений см. [Вахрамеева и др., 2008]).

В психофизических исследованиях измеряли пороги фрагментации контурных двумерных изображений, достаточные для распознавания трехмерных объектов при имитации изменения углов их наблюдения. В результате измерений была получена зависимость порогов распознавания фрагментированных двумерных изображений (в процентах от величины предъявляемого контура) от повторения наблюдения при варьировании углов наблюдения трехмерного объекта.

На рис. 8.4 представлены результаты измерений порогов восприятия для первой группы испытуемых, наблюдавших изображения объектов при одном и том же значении угла наблюдения в зависимости от повторения наблюдения. Данные усреднены как для всех испытуемых, так и для всех предъявляемых объектов. При первом предъявлении изображений порог составлял разную величину для различных объектов и разных испытуемых. При втором предъявлении распознавание резко улучшалось и держалось при последующих предъявлениях примерно на одном и том же уровне — ниже 20 % от величины контура. Этот минимальный уровень фрагментации инвариантен после третьего предъявления. Таким образом, можно предположить, что шаблон (образ наблюдаемого объекта) начинает вырабатываться сразу после первого предъявления стимулов и окончательно оказывается выработан на третьем предъявлении.

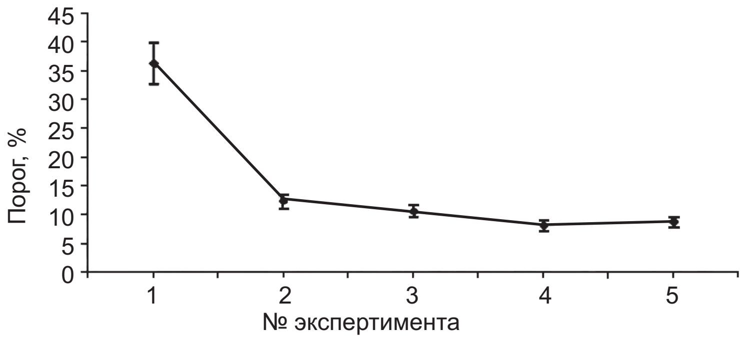


Рис. 8.4. Зависимость порога распознавания фрагментированных двумерных изображений от повторения наблюдения при одном и том же значении угла наблюдения

На рис. 8.5 показаны результаты измерений, полученные для второй группы испытуемых, наблюдавших изображения объектов при изменении угла наблюдения путем поворота вокруг оси Y каждый раз на 15°. Данные усреднены как для всех испытуемых этой группы, так и для всех предъявляемых объектов. Кривые аналогичны представленным на рис. 8.4 кривым, за

исключением того, что наблюдается незначительное повышение порога при пятом предъявлении стимула, когда поворот объекта достиг величины 60°.

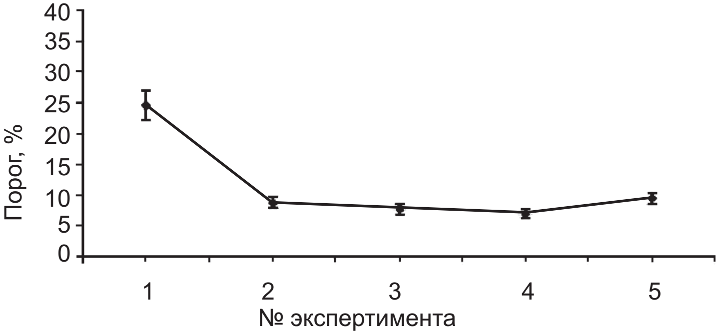


Рис. 8.5. Зависимость порога распознавания (в процентах от величины предъявляемого контура) фрагментированных двумерных изображений от повторения наблюдения при изменении угла их наблюдения путем поворота вокруг оси *Y* каждый раз на 15°. По оси абсцисс — порядковый номер исследования; по оси ординат — процент правильных ответов

Результаты наблюдения изображений при повороте объекта одновременно вокруг двух осей — *X* и *Y* — с шагом 15° представлены на рис. 8.6. Кривые ведут себя аналогично предыдущему случаю. Наблюдается незначительное повышение порогов от второго к пятому предъявлению стимулов. Незначительные колебания порогов для разных объектов объясняются спецификой их двумерного представления.

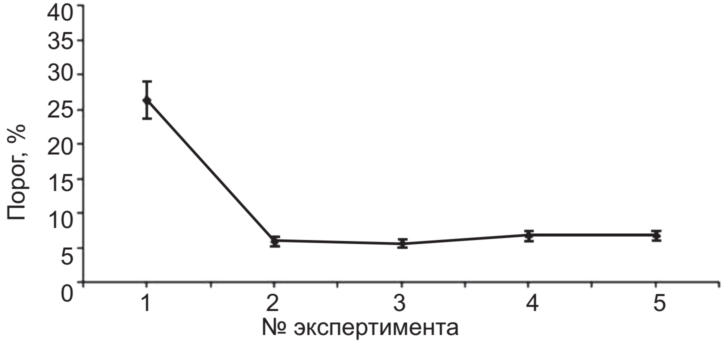


Рис. 8.6. Зависимость порога распознавания (в процентах от величины предъявляемого контура) фрагментированных двумерных изображений от повторения наблюдения при повороте объекта одновременно вокруг двух осей — *X* и *Y* — каждый раз на 15°. По оси абсцисс — порядковый номер исследования; по оси ординат — процент правильных ответов

Представленные данные убедительно показывают, что выработанный шаблон обладает свойствами инвариантности, так как пороги восприятия не зависят от поворота объекта на угол от 15 до 60 угл. град. [Чихман и др., 2011].

Надо сказать, что ранее диапазон угловых размеров и ориентаций, при которых может наблюдается инвариантность, не был известен. Исследования, проведенные в нашей лаборатории, позволили впервые установить влияние размеров изображения на пороги восприятия неполных изображений, обнаружить диапазон размеров, в котором пороги восприятия неполных изображений не зависят от их масштабов. Это оказалось возможным только благодаря применению Голлин-теста, с использованием бинарных контурных изображений. Вне этого диапазона (при уменьшении размера изображения менее 1 угл. мин. и при увеличении размера стимулов более 50 угл. град.) происходит увеличение порогов восприятия неполных изображений. Минимальные значения порога восприятия неполных изображений соответствуют области инвариантности восприятия [Вахрамеева и др., 2008].

Из полученных нами данных также следует, что нарушения инвариантности восприятия наступают тогда, когда размер изображения приближается к угловым размерам фовеа, а пороги зависят от сложности изображения. Некоторые авторы уже давно обращали внимание на особенности восприятия изображений на таких дистанциях до объекта, при которых его угловые размеры согласованы с фовеа [Кемпбелл, Шелепин, 1990; Шелепин и др., 1995; Ross et al., 1980]. Нами было показано, что диапазон инвариантности, то есть диапазон размеров, при которых пороги восприятия достоверно не отличаются друг от друга, простирается до очень малых размеров стимулов, при которых угловые размеры стимула приближаются к размерам фовеа. Нарушение инвариантности при малых размерах обусловлено тем, что на процесс распознавания при таких размерах изображений существенное влияние начинает оказывать острота зрения. Повышение порогов и появление нераспознанных изображений для размеров стимулов 0,19 угл. град. можно объяснить влиянием внутреннего шума зрительной системы (в частности, шумом дискретизации изображения на сетчатке). В соответствии с фактором магнификации и моделью лог-полярного картирования центральная область поля зрения, представляющая фовеолу, имеет максимальное представительство в коре. Однако на изображения объектов, наблюдаемых на пределе разрешения, начинают оказывать существенное влияние, во-первых, размытие их оптикой глаза и, во-вторых, воздействие шумов дискретизации. В результате значительная часть информации, содержащейся в этих изображениях, может быть утеряна.

Результаты проведенных нами измерений позволили также установить диапазон угловых размеров, при котором имеет место инвариантное опо-

знание. Понятны и условия, при которых эта инвариантность нарушается. При наблюдении больших изображений (более 50 угл. град.) могут возникнуть условия, когда распознавание без прослеживающих движений глаз и головы невозможно. При малых же угловых размерах шум дискретизации не позволяет улучшить распознавание даже при наблюдении нефрагментированных изображений.

Диапазоны инвариантного восприятия как у неопытных испытуемых, так и у опытных, выучивших данный алфавит стимулов, одинаковы. Отсюда следует еще один важный вывод: инвариантное опознание обеспечивают либо врожденные механизмы, либо механизмы, выработанные в младенчестве на ранних этапах онтогенеза.

Распознавание объектов, инвариантное к их размеру, является важнейшей особенностью зрительного анализатора человека, во многом определяющей эффективность его поведения в реальном мире. Механизм инвариантности не мешает работе механизма оценки размера, они работают одновременно [Глезер, Цуккерман, 1961; Глезер и др., 1975; Стефанова, 1964; 1970; Stefanova, 1974].

Каковы механизмы инвариантного описания размера? Рассмотрим две основные модели инвариантного описания воспринимаемых изображений в зрительной системе человека. Это так называемые модель лог-полярного картирования и модель пирамиды. Обе модели используются в компьютерных программах для распознавания различных классов объектов.

Модель лог-полярного картирования учитывает геометрию проекции сетчатки в зрительную кору. Известно, что разные области сетчатки проецируются в кору неодинаково, что находит отражение в значениях фактора магнификации [Hubel, Wiesel, 1974]. Преобразование координат сетчатки в проекцию ее зон в кору хорошо описывается механизмом лог-полярного картирования [Dow et al., 1981; Mehanian, 1991; Schwartz, 1980; 1983; Weiman, 1990; Zokai, Wolberg, 2005]. В модели лог-полярного картирования ретинотопика стриарной коры представлена сложным логарифмическим отображением. Выход сигнала из стриарной коры после такого топографического преобразования подвергается обработке в больших рецептивных полях экстрастриарной коры.

Другая модель — так называемая модель пирамидальной обработки информации [Александров, Горский, 1985; Шелепин и др., 1995; Burt, Adelson, 1983; Cantoni, Petrosino, 2002]. Имеются различные пирамидальные модели обработки изображений. Обычно пирамидное представление формируется путем последовательной свертки изображения с неким ядром (например, гауссианом), причем для формирования n-го уровня пирамиды масштаб этого ядра берется пропорциональным $2n$, а частота дискретизации — обратно пропорциональной $2n$. В результате каждый уровень

пирамиды содержит в себе подвергнутую пространственной фильтрации копию исходного изображения в масштабе, пропорциональном 2*n*. Существует множество видов пирамидных представлений, отличающихся друг от друга в основном типом используемого ядра.

Предположим, что у нас имеется ряд изображений одного и того же объекта в различных масштабах. Если представить каждое из этих изображений в виде пирамиды, то при любом масштабе объекта на исходном изображении можно будет найти такой уровень пирамиды (зависящий от масштаба), на котором данный объект будет иметь приблизительно один и тот же размер. Это свойство пирамидного представления с успехом применяется, например, в базах данных для поиска изображений по образцу или в системах машинного зрения.

Пример работы рецептивных полей одного слоя пирамиды представлен на рис. 8.7. На этом рисунке изображены круглые рецептивные поля низших отделов зрительной системы.

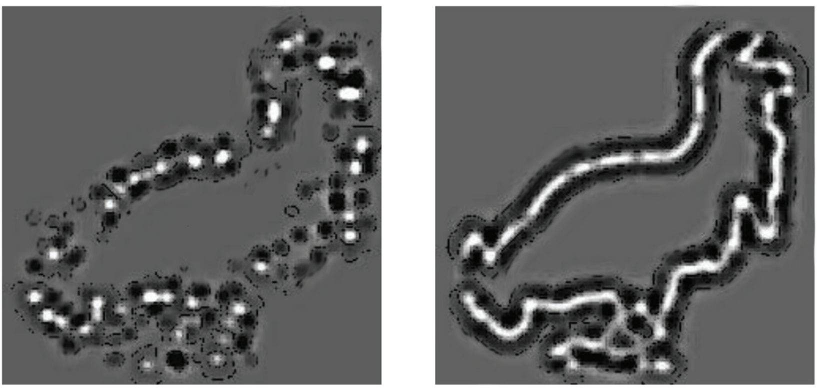


Рис. 8.7. Пример моделирования работы рецептивных полей одного слоя пирамиды при разной степени фрагментации (слева — при малом числе фрагментов, справа — при большом). Показаны *on*- и *off*-рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки одного размера

Ориентационная составляющая возникает в результате конвергенции близлежащих рецептивных полей. Однако если предположить, что пирамида — это второй, корковый механизм, обеспечивающий инвариантность восприятия формы, то конфигурация рецептивных полей будет иной. Интересно попытаться определить локализацию в коре механизма инвариантного описания. Ранее нами были проведены исследования по локализации инвариантного глобального описания изображений в мозгу хищных млекопитающих [Шелепин, 1973]. В более поздних работах была показана лока-

лизация глобального описания в мозгу приматов, включая человека [Фокин и др., 2007; Braddick, Atkinson, 2007 a; 2007 b], и в гомологичных областях коры головного мозга хищников. Эти области престриарной коры имеют большие рецептивнае поля и настроены на низкие пространственные частоты [Шелепин, 1984].

Полученные нами данные о нарушении инвариантности восприятия при размерах стимула меньше фовеа и равные фовеоле позволяют подтвердить справедливость модели пирамидальной обработки. Это связано с тем, что фовеола соответствует одному слою пирамиды, а один слой пирамиды не может обеспечить инвариантное описание.

Проведенные нами серии измерений количественно иллюстрируют работу механизма описания, инвариантного к углу наблюдения трехмерного объекта. В рамках теории статистических решений Н. Н. Красильниковым и его соавторами была исследована эффективность зрительной системы человека в условиях распознавания трехмерных тестовых объектов, алфавит которых задан и ограничен [Красильников, Мироненко, 2006; Красильников и др., 2006]. Исследование проводили для случаев, когда угол наблюдения на этапе распознавания мог быть произвольным, но вид объекта под этим углом был знаком наблюдателю. При исследовании применяли метод сравнительных измерений. Суть этого метода заключается в сравнении вероятности обнаружения сигнала наблюдателем и математической моделью оптимального наблюдателя [Красильников, Шелепин, 1997; Красильников и др., 1999 а; 1999 б; 1999 в; 2002; 2003 а; 2003 б; Shelepin et al., 2000]. Был использован широкий круг тестовых объектов: от простейших изображений трехмерной графики до сложных трехмерных портретов людей с наложенной текстурой. Сравнение с идеальным наблюдателем авторы осуществляли путем вычисления коэффициента эффективности. Этот коэффициент был введен Горацием Барлоу и определяется следующим образом:

$$\boldsymbol{K = E\,id/Eh},$$

где *E id* и *Eh* — пороговые значения энергии сигнала (contrast energies) для идеального наблюдателя и человека-наблюдателя соответственно, которые обеспечивают правильное опознавание изображения с одной и той же вероятностью P. Величина, обратная коэффициенту эффективности, показывает, во сколько раз нужно увеличить энергию изображений в случае их опознавания человеком-наблюдателем по отношению к энергии изображений, опознаваемых идеальным наблюдателем, для того чтобы получить одинаковые вероятности их правильного опознавания.

Поскольку в определении коэффициента эффективности, согласно Г. Барлоу, фигурирует идеальный наблюдатель, то предполагается, что все

параметры опознаваемого (идентифицируемого) изображения идеальному наблюдателю априорно известны [Barlow, 1978]. В случае же человека-наблюдателя часть параметров изображения может быть априорно неизвестна. Отсутствие априорной информации о параметрах наблюдаемых изображений, например об ориентации или об угле наблюдения, приводит к уменьшению коэффициента эффективности [Красильников, Мироненко, 2006 а; Красильников и др., 2006 б].

При опознавании трехмерных объектов, наблюдаемых в трехмерном пространстве, или при их разных проекциях на плоскость имеется принципиальное отличие от опознавания двумерных изображений трехмерных объектов, представленных всегда при одном и том же угле наблюдения. В исследованиях Н. Н. Красильникова и соавторов, как в первом, так и во втором случае, опознаванию предшествовало обучение наблюдателя. В случае опознавания трехмерных объектов углы наблюдения объектов, предъявляемых наблюдателю при опознавании, могут не совпадать с углами наблюдения, под которыми они были предъявлены во время обучения. В случае опознавания объектов на двумерных изображениях и при обучении, и при опознавании углы наблюдения были всегда одинаковы [Красильников, Мироненко, 2006 а; Красильников и др., 2006 б].

Как осуществляется в мозге представление трехмерных зрительных объектов? Этой проблеме посвящены работы многих авторов [Красильников, Мироненко, 2006 а; Красильников и др., 2006 б; Biederman, Cooper, 1991 a; 1991 b; Lazareva et al., 2008; Poggio, 1990; Suterland, 1979; Tarr et al., 1998; Ullman, 1989; 1996; Wang, 2005]. Согласно Марру, на этапе обучения зрительная система по ряду двумерных проекций на сетчатке трехмерных объектов строит их трехмерные представления в мозге наблюдателя, которые и запоминает [Marr, 1987]. При опознавании трехмерных объектов зрительная система сравнивает их проекции на сетчатках глаз с хранящимися в памяти наблюдателя трехмерными представлениями, сформированными на этапе обучения. Затем на основании этого сравнения наблюдатель принимает решение о принадлежности предъявляемых проекций тому или иному объекту.

Представление о форме трехмерных объектов из окружающего нас мира мы формируем на основании множества их двумерных проекций на сетчатку наших глаз, при этом одному и тому же трехмерному объекту при разных углах наблюдения соответствует множество сильно различающихся между собой его двумерных проекций. Поскольку угол наблюдения объекта, как правило, наблюдателю априорно неизвестен, это усложняет условия наблюдения и, как следствие, приводит к уменьшению вероятности правильного опознавания объекта в пороговых условиях наблюдения, а значит, к уменьшению коэффициента эффективности.

В наших исследованиях обучение алфавиту (набору) стимулов происходило во время проведения измерений. Наблюдение изображений при первом измерении позволяет испытуемому ознакомиться и определить размер алфавита стимулов. При последующих измерениях эффективность работы наблюдателя была обусловлена знакомством с этим алфавитом. Повороты объекта в заданных пределах величин не влияли на эффективность опознания, так как предположительно работал механизм инвариантности к повороту (наклону, ракурсу). В последующие дни, хотя в предъявляемых изображениях мы монотонно наращивали отклонение от исходного угла наблюдения, пороги распознавания не уменьшались. В каждом новом измерении наблюдатель не знал, какой угол наблюдения будет задан. После ознакомления с алфавитом стимулов во все остальные дни измерений ответы наблюдателя демонстрировали инвариантность восприятия к поворотам трехмерного объекта в данном диапазоне углов наблюдения.

Сложность обсуждения полученных данных заключается именно в объяснении работы механизма инвариантности. Одна из существующих гипотез предполагает, что зрительная система представляет стимулы в психологическом метрическом пространстве малой размерности [Shepard, Cooper, 1983]. Этот подход Шепарда поддерживается и развивается другими исследователями. Измерения и модельные расчеты, выполненные Эдельманом [Edelman, Bulthoff, 1992; Edelman, Weinshall, 1991; Podgio, Edelman, 1990], и наши данные подтверждают идею о том, что распознавание трехмерных объектов может быть основано на представлении в малоразмерном пространстве признаков.

Ульман, развивая свой подход на основе образного (графического) описания, утверждает, что распознавание трехмерных объектов базируется на комбинации малого числа видов объекта, связанных с различным направлением взора [Ullman, 1989; 1996]. При проверке этого подхода посредством психофизических опытов получены данные, поддерживающие теорию интерполяции двумерных видов при распознавании трехмерных объектов. Считается, что способность распознавания трехмерных объектов основана на генерации шаблонов с метрическими свойствами, которые выучивались при разных ориентациях. Трехмерный объект в этом случае представляется как ряд двумерных шаблонов [Красильников, Мироненко, 2006 а; Красильников и др., 2006 б].

Альтернативный подход в описании трехмерной структуры объектов основан на использовании объемных геометрических примитивов, так называемых геонов. Есть ряд существенных свойств геонов. Один геон можно отличить от других при наблюдении с любых точек зрения, за исключением редких случаев с очень ограниченными углами, в которых проекция геона данного типа становится неотличимой от проекции геона другого типа, на-

пример в случае сферы и цилиндра, наблюдаемого с торца. Геоны устойчивы к зрительным помехам. Поскольку геоны просты, они легко поддерживают гештальт гладкого продолжения, что делает их идентификацию устойчивой к частичному перекрытию и наложению мультипликативной помехи. Геоны инвариантны к направлению освещения. Геоны отличаются качественно, двумя или тремя атрибутами, такими как прямая или изогнутая, параллельная или непараллельная, положительная и отрицательная кривизна. Эти качественные отличия могут быть легко различимы, что и геоны делает легко различимыми, а также объекты, изображения которых могут быть скомпонованы из этих геонов [Biederman, Cooper, 1991 a; 1991 b; Lazareva et al., 2008; Hummel, Biederman, 1992].

Любой трехмерный объект может быть описан набором геонов различных типов. В рамках данного подхода предполагается, что ключевую роль здесь могут играть специфические признаки, относительно устойчивые к вращению объекта и играющие центральную роль в различении отдельных его элементов — геонов. В результате наблюдатель может распознавать объект при вращении без предварительного знакомства с новыми его видами.

Было показано [Wang, 2005], что обезьяны, обучившись разделять индивидуальные виды объектов, были способны распознавать объекты при вращении последних до 60°, хотя у них не было возможности изучить ассоциации между парами различных видов объекта. Было сделано предположение, что распознавание при малых или средних изменениях угла наблюдения зависит от признаков, общих для различных видов объекта. Эти данные также совпадают с результатами проведенных нами измерений. Наши данные позволяют предположить, что шаблон (образ наблюдаемого трехмерного объекта) вырабатывается сразу после первого предъявления двумерного изображения. Этот шаблон обладает свойствами инвариантности, так как не зависит от ориентации объекта, по крайней мере от 15 до 60 угл. град. Однако точный диапазон не был показан из-за особенностей проведения исследований. Так, мы последовательно накапливали отклонение на определенный угол с шагом в 15 угл. град. Подобный алгоритм проведения измерений был обусловлен необходимостью получения основных данных без обучения наблюдателя всему набору стимулов.

Возможно, зрительная система экстраполирует полученные при первом предъявлении сведения об изображении при одном угле наблюдения на другие углы наблюдения.

Результаты проведенных нами измерений не соответствуют исходной гипотезе, согласно которой точность и полнота формируемых шаблонов зависят от количества углов наблюдения, использованных на этапе обучения [Красильников, Мироненко, 2006 а; Красильников и др., 2006 б]. Испытуемые в наших исследованиях были взрослыми людьми, поэтому

механизм экстраполяции у них работал еще при обучении данному классу изображений, а мы применяли стимулы, знакомые в повседневной жизни.

Полученный нами результат важен, так как, согласно исходной гипотезе, точность и полнота формируемых шаблонов зависят от количества углов наблюдения, использованных на этапе обучения.

При изменении масштаба работают врожденные механизмы инвариантности. Шаблон, или код инвариантного описания образа, — обобщенный, что позволяет экстраполировать данный шаблон на другие ориентации с шагом по меньшей мере в 15 и максимум 60 угл. град. Это утверждение основано на результатах, полученных в третьей серии измерений. В зрительной системе, вероятно, достаточно хранить несколько шаблонов при разных (далеко отстоящих) разворотах одного объекта. Таким образом, можно предполагать, что неточность, а вернее обобщенность, инвариантного описания к разворотам позволяет осуществить сжатие значительной информации.

8.3. ИНВАРИАНТНОСТЬ ВОСПРИЯТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОСЛЕ ВЕЙВЛЕТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В статье «Экспериментальное исследование инвариантного восприятия вейвлетных изображений» [Чихман и др., 2011] нами описаны психофизические исследования зрительного восприятия неполных контурных изображений. Изображения синтезировали с помощью вейвлетов. В качестве вейвлетов использовали *DoG*-функцию (Difference of Gaussians) и ориентированные вейвлеты, спектр которых ограничен как по частотному диапазону, так и по диапазону ориентаций. Варьировали размер изображений, число и угловой размер вейвлетов. Установлена зависимость между характеристиками вейвлетов и порогами распознавания неполных изображений. Было показано, что зрительная система человека, наряду с возможностью восприятия индивидуальных особенностей изображений наблюдаемого объекта, обладает способностью инвариантного восприятия образов при изменении различных параметров зрительного представления объектов — освещенности, размера, ориентации. Однако до сих пор не в полной мере определены диапазоны инвариантности зрительного восприятия по широкому спектру варьируемых параметров наблюдаемых объектов.

Психофизические и электрофизиологические исследования инвариантности распознавания человеком зрительных образов помимо фундаментальных целей имеют прикладное значение для разработки систем

машинного зрения. Именно решение практических задач требует определения количественных диапазонов инвариантности [Ghosh, Petkov, 2005]. Отсутствие данных о диапазонах инвариантности зрительной системы человека к различным преобразованиям параметров наблюдаемых объектов вынуждает инженеров задавать избыточные характеристики для искусственных распознающих систем.

Вопросы изучения инвариантных механизмов зрительного восприятия привлекают внимание многих исследователей. Известны работы по инвариантному описанию зрительных изображений объектов на базе так называемого лог-полярного картирования [Mehanian, Rak 1991; Weiman, 1990; Zokai, Wolberg, 2005]. Последнее характеризуется учетом геометрии проекции сетчатки в зрительную кору, при этом ретинотопика коры представлена сложным логарифмическим отображением зрительной сцены. Описание отдельных объектов в этой сцене дополняет модель согласованной фильтрации [Красильников, Шелепин, 1997]. Для описания изображений и сцен применяют пирамидальное представление обработки зрительной информации [Александров, Горский, 1985; Шелепин и др., 1995; Burt, Adelsjn, 1983; Cantoni, Petrosino, 2002]. Пирамидальное представление формируется путем последовательной свертки изображения с неким ядром (например, гауссианом), причем для формирования n-го уровня пирамиды масштаб этого ядра берется пропорциональным 2n, а частота дискретизации — обратно пропорциональной $2n$. В данной работе стояла задача исследования в психофизиологических экспериментах инвариантности к угловым размерам зрительного восприятия неполных контурных изображений объектов. Для организации экспериментального измерения диапазонов инвариантности зрительного восприятия необходимо было выбрать определенную количественную характеристику, которая описывает результат восприятия. В наших предыдущих работах [Shelepin et al., 2004; Chikhman et al., 2006; Шелепин и др., 2008] представлены серии экспериментов по изучению инвариантности зрительного восприятия, в которых в качестве такой характеристики использовался результат Голлин-теста — теста восприятия неполных изображений. Наши предыдущие исследования инвариантности с использованием методики Голлин-теста [Chikhman et al., 2006; Вахрамеева и др., 2008] показали, что в диапазоне угловых размеров от 1 до 50° пороги восприятия неполных изображений не зависят от их углового размера. Однако у стандартной методики Голлин-теста имеется недостаток, который можно определить как несогласованность воздействия используемых зрительных стимулов с организацией рецептивных полей зрительной системы. Основной источник этой несогласованности связан с тем, что контурные бинарные зрительные стимулы характеризуются широким спектром пространственных частот. Однако известно, что нейро-

ны зрительной коры головного мозга реагируют на стимулы, спектры которых лежат в ограниченных диапазонах пространственных частот. Для рецептивных полей нейронов первичной зрительной коры средняя ширина этого диапазона, по данным экспериментов, равна 1,4 октавы [DeValois et al., 1982; Шелепин, 1981; Шелепин, 1982]. Кроме того, большая часть рецептивных полей обладает ориентационной избирательностью и реагирует на стимулы, спектральные компоненты которых имеют определенный диапазон ориентаций. Спектр бинарных фрагментированных изображений стандартного Голлин-теста перекрывает полосы пропускания рецептивных полей большинства нейронов, так как в нем содержатся низкочастотные и высокочастотные составляющие.

Возникает вопрос: можно ли сформировать оптимальный зрительный стимул, избирательно воздействующий только на небольшую группу нейронов с близкими пространственно-частотными характеристиками? Очевидно, такой стимул должен иметь угловой размер, не превышающий углового размера рецептивных полей этой группы нейронов, а его спектр должен лежать внутри области пространственных частот, на которую эти нейроны настроены. Кроме того, экспериментально было показано, что для рецептивных полей нейронов первичной зрительной коры ширина полосы пропускания, выраженная в октавах, не зависит от пространственной частоты, на которой они дают максимальный отклик. Следовательно, спектры зрительных стимулов тоже должны обладать этим свойством, то есть ширина их спектров в октавах не должна зависеть от частоты максимума их спектра. Этим требованиям отвечают вейвлеты — функции, имеющие хорошую локализацию как в пространственной, так и в частотной области. В общем случае двумерный вейвлет может быть описан как функция следующего вида:

$$f(x,y)=\frac{1}{S}g\left(\frac{x-x_0}{S},\frac{y-y_0}{S}\right),$$

где $g(x, y)$ — функция с нулевым средним значением, отвечающая требованию хорошей пространственной и частотной локализации; S — масштаб (размер вейвлета); x_0, y_0 — координаты центра вейвлета.

Простейшим примером вейвлета является так называемая *DoG*-функция (Difference of Gaussians) — вейвлет, представляющий собой разность двух двумерных функций Гаусса с различной полушириной:

$$f(x,y,\sigma)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp(-(x^2+y^2)/(2\sigma^2))-$$

$$-\frac{1}{2\pi N^2\sigma^2}\exp(-(x^2+y^2)/(2N^2\sigma^2)),$$

где σ — стандартное отклонение; N — масштабный коэффициент.

На рис. 8.8 показаны примеры *DoG*-функций трех размеров и их амплитудные спектры. Амплитудный спектр фрагментированного изображения, составленного из таких вейвлетов, будет лежать в том же частотном диапазоне, что и спектр одиночного вейвлета. Однако *DoG*-функция характеризуется тем, что ее спектр содержит спектральные составляющие со всеми возможными ориентациями [Чихман и др., 2011].

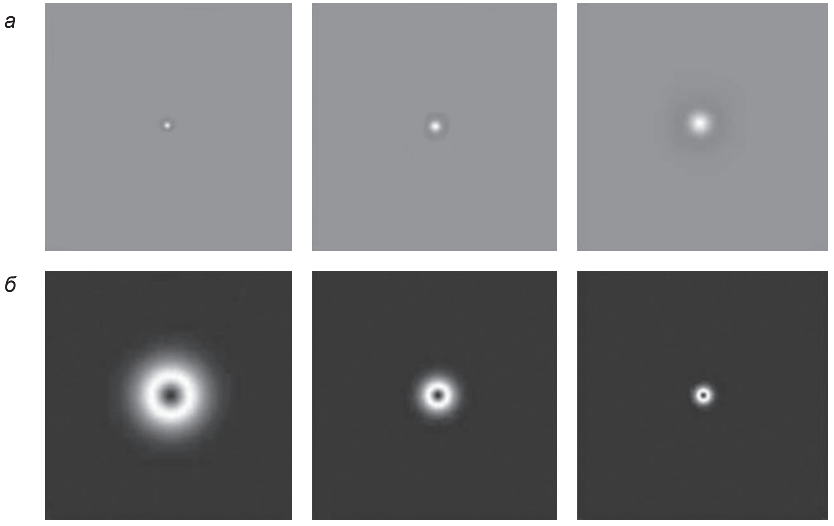


Рис. 8.8. Изображения DoG-функций (*а*) и их спектров (*б*)

Между тем нейроны зрительной коры могут обладать ориентационной избирательностью, для экспериментов с ними может потребоваться стимул, селективно воздействующий только на клетки, чувствительные к какой-то определенной ориентации. Существуют вейвлеты, которые удовлетворяют этим требованиям, — ориентированные вейвлеты. К ним относятся, например, вейвлеты, обладающие селективностью как по пространственной частоте, так и по ориентации функции Габора и представляющие собой синусоиду, умноженную на функцию Гаусса:

$$f(x, y, \sigma, \theta, \varphi) = G(x, y, \sigma)\cos(2\pi\omega(x\cos(\Theta)) + y\sin(\theta)) + \varphi),$$

где σ — стандартное отклонение; $G(x, y, \sigma)$ — функция Гаусса; ω — пространственная частота; θ — ориентация; φ — фаза.

На рис. 8.9 показаны примеры ориентированных вейвлетов разных размеров и их амплитудные спектры [Чихман и др., 2011].

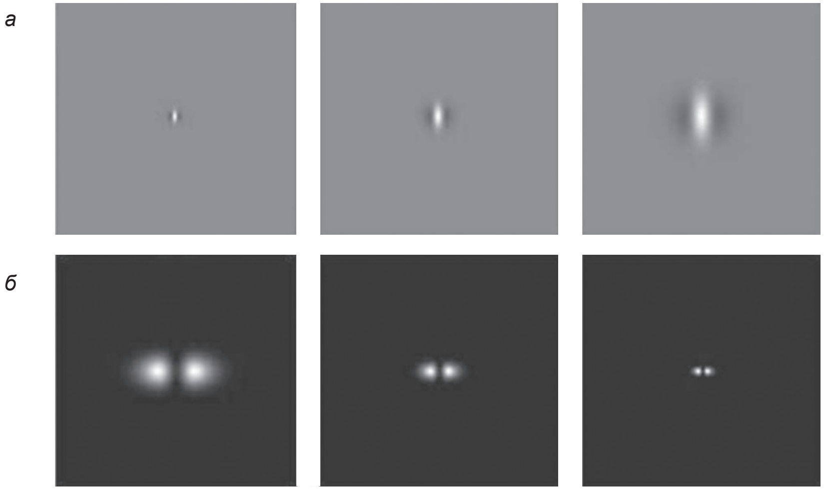


Рис. 8.9. Изображения ориентированных вейвлетов (*а*) и их спектров (*б*)

Итак, формируя тестовые неполные изображения из вейвлетов, можно предполагать их воздействие только на небольшую группу зрительных нейронов с близкими пространственно-частотными полосами пропускания. К сожалению, есть один фактор, который не позволяет легко достичь такой точной избирательной стимуляции. Дело в том, что спектры многих вейвлетов, в частности *DoG*-функций, несмотря на выраженный пик, достаточно широки и могут существенно перекрываться, что снижает избирательность воздействия сформированных на их основе визуальных стимулов.

На рис. 8.10 показаны сечения двумерных спектров двух *DoG*-функций, отличающихся по угловому размеру в 2,8 раза. Видно, что их спектры существенно перекрываются, хотя их максимумы хорошо разделены. Для сравнения внизу показана ширина полосы пропускания типичной клетки первичной зрительной коры, равная 1,4 октавы. Очевидно, в эту полосу попадают оба спектра. В результате на вейвлет, который является оптимальным стимулом для определенной группы нейронов, будут реагировать также и другие нейроны, если пространственно-частотные диапазоны их рецептивных полей даже незначительно перекрываются со спектром данного вейвлета. Чтобы устранить этот нежелательный эффект, можно использовать простой прием понижения контраста вейвлетов до порогового уровня. Основанием для этого служит предположение, что при пороговом контрасте вейвлета на него будут реагировать только те нейроны, для которых он является оптимальным стимулом. У нейронов, для которых этот вейвлет не является

оптимальным стимулом, реакция на стимул окажется ниже уровня внутреннего шума. Таким образом можно дискриминировать избирательное воздействие стимулов по пространственной частоте, то есть стимулировать только те нейроны, для которых данный стимул является близким к оптимальному.

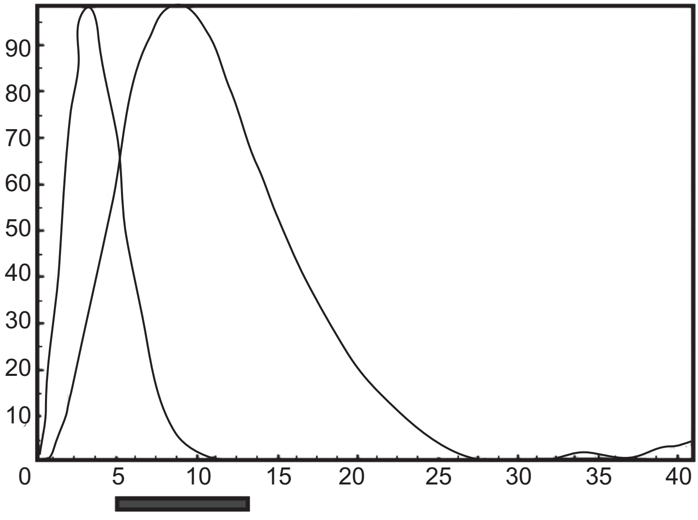


Рис. 8.10. Сечения двумерных спектров *DoG*-функций, отличающихся по угловому размеру в 2,8 раза; внизу показана ширина полосы пропускания типичной клетки первичной зрительной коры, равная 1,4 октавы

Психофизический эксперимент с использованием стандартной методики Голлин-теста проводится следующим образом. Имеется набор из нескольких десятков контурных изображений общеизвестных объектов, хорошо знакомых испытуемому. Компьютерная программа разбивает контуры этих изображений на фрагменты фиксированного размера, которые выводятся в случайном порядке на экран монитора, постепенно формируя полный контур объекта. Вывод фрагментов останавливается в момент, когда испытуемый распознал изображение. При этом программа фиксирует в момент распознавания степень пороговой фрагментации изображения, которая равна отношению суммарной площади предъявленных фрагментов контура к полной площади контура. Чем выше этот процент, тем хуже распознается изображение. В проведенных нами измерениях испытуемым предъявлялись в режиме Голлин-теста неполные изображения, состоящие из цепочек вейвлетов. Для формирования тестовых изображе-

ний использовались как *DoG*-функции, так и ориентированные вейвлеты. В качестве тестовых изображений-стимулов были использованы контуры букв и цифр (всего 24 изображения). При синтезе неполного изображения контур буквы или цифры аппроксимировался цепочкой вейвлетов с заданным постоянным шагом между ними. При проведении измерений программа в случайном порядке выводила вейвлеты на экран, постепенно формируя контур объекта. Пороговый уровень фрагментации фиксировался в тот момент, когда испытуемый распознавал изображение. Порог восприятия определялся как процент вейвлетов, выведенных на экран в момент распознавания объекта испытуемым, от общего числа вейвлетов в синтезированном неполном изображении на выбранном уровне пирамидального представления. В измерениях участвовало пять испытуемых. Были проведены измерения по исследованию инвариантности зрительного восприятия к угловому размеру изображений. Угловой размер изображений менялся от 1 до 4°. С каждым испытуемым было проведено несколько серий измерений с единичным и пороговым контрастом.

Под пороговым контрастом понимался минимальный контраст, при котором испытуемый мог обнаружить на экране изображение вейвлета. Этот пороговый контраст определялся отдельно для каждого испытуемого и для каждого размера вейвлета. Пример использованных фрагментированных изображений, составленных из ориентированных вейвлетов, а также часть полученных результатов показаны на рис. 8.11.

Видно, что при единичном контрасте инвариантность к угловому размеру в данных пределах сохраняется, что согласуется с полученными нами ранее данными [Шелепин и др., 2008; Вахрамеева и др., 2008]. Таким образом, при надпороговом контрасте ответ инвариантен относительно размера изображения. Однако из рисунка видно, что в случае порогового контраста вейвлетов инвариантность восприятия отсутствует: чем больше угловой размер изображений, тем хуже они распознаются.

Возникает вопрос: в чем причина этого нарушения инвариантности? Предлагается следующее объяснение этих результатов. По мере увеличения углового размера изображения оно выходит за пределы фовеальной области. Но чем больше угловое расстояние от центра фовеальной области, тем (в среднем) больше размер рецептивных полей нейронов, причем максимум их чувствительности смещается в область низких пространственных частот [Шелепин, 1982; Ginsburg, 1986; Шелепин и др., 1985]. В результате небольшие по размеру вейвлеты, из которых состоят данные изображения, не являются оптимальными стимулами для этих нейронов. И если контраст вейвлетов близок к пороговому, нейроны на такие стимулы не реагируют из-за высокого уровня внутреннего шума. Если вейвлеты небольшие, испытуемый рассматривает изображение как бы через узкое

а

б

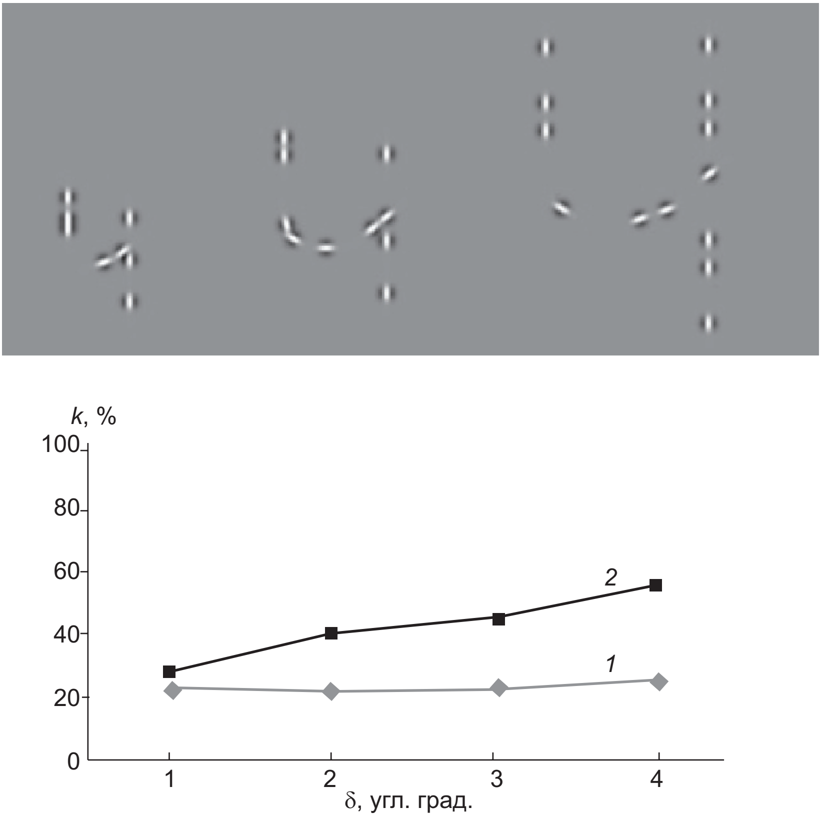


Рис. 8.11. (*а*) — примеры фрагментированных изображений разного размера из цепочек одинаковых ориентированных вейвлетов; (*б*) — зависимости порога восприятия (доля *k* от общего числа вейвлетов, при котором произошло распознавание) от углового размера изображения *δ* при единичном (1) и пороговом (2) контрасте [Чихман и др., 2011]

отверстие, через которое виден лишь его небольшой фрагмент. Естественно, в этих условиях распознавание ухудшается.

Следует заметить, что в этом эксперименте при изменении углового размера изображений угловой размер самих вейвлетов оставался одинаковым в отличие от ситуации, когда тестовые изображения рассматриваются с различных дистанций (в последнем случае с изменением углового размера фигур пропорционально менялся бы и размер вейвлетов). В другой серии измерений было исследовано влияние на процесс распознавания

изменения размеров самих вейвлетов при прочих равных условиях. Угловой размер всех изображений был равен двум угловым градусам, следовательно, изображения целиком попадали в фовеальную область. Пример использованных в этих экспериментах изображений и полученные результаты иллюстрирует рис. 8.12.

На графике по оси ординат отложена доля предъявленных вейвлетов, при которой произошло распознавание. Первая диаграмма показывает результаты измерений при размере вейвлетов 54 угл. мин. Из диаграммы видно, что при единичном контрасте порог был равен 73 % (столбик 1), при пороговом контрасте — 96 % (столбик 2). Это означает, что большинство неполных изображений при пороговом контрасте вообще не распо-

а



б

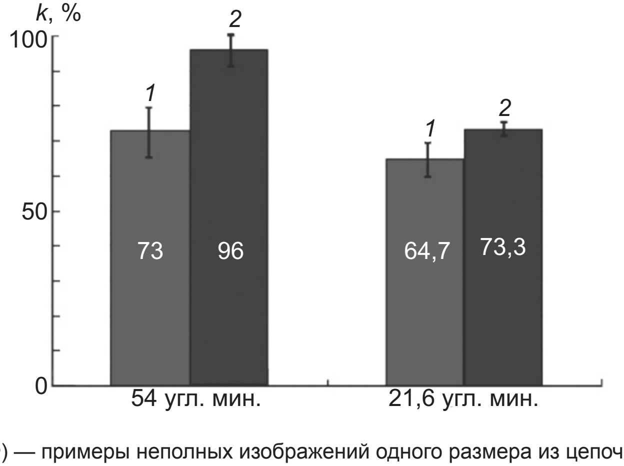


Рис. 8.12. (*а*) — примеры неполных изображений одного размера из цепочек вейвлетов разного размера; диаграммы зависимости доли *k* предъявленных вейвлетов, при которой произошло распознавание; (*б*) — на оси абсцисс указаны размеры вейвлетов при единичном (1) и пороговом (2) контрасте [Чихман и др., 2011]

знавались. Они распознавались только тогда, когда почти весь контур был выведен на экран.

Вторая диаграмма — те же измерения, но при размере вейвлетов в 21,6 угл. мин. Видно, что для единичного контраста результаты практически не изменились (столбик 1), в то время как для порогового контраста неполные изображения стали уверенно распознаваться и порог понизился до 73,3 % (столбик 2). То есть увеличение угловых размеров вейвлетов при прочих равных условиях улучшило распознавание тестовых изображений.

Можно предложить следующее объяснение результатов этих измерений. В процессе распознавания объекта происходит объединение информации от клеток с рецептивными полями, расположенными в различных местах поля зрения; при этом можно предположить, что на ранних этапах обработки процесс анализа локализован, то есть объединяется информация только с тех рецептивных полей, которые расположены в поле зрения рядом друг с другом, не дальше, чем некое максимальное расстояние *D* в поле зрения. Если угловая дистанция между вейвлетами во фрагментированном изображении больше *D*, процесс объединения отдельных вейвлетов в общий контур затруднен, что приводит к ухудшению распознавания. Предположим, что эта дистанция *D* в угловых единицах тем больше, чем больше угловой размер рецептивного поля. Увеличение углового размера вейвлетов в данных экспериментах приводило к тому, что они становились оптимальными стимулами для нейронов с более крупными угловыми размерами рецептивных полей. Объединение информации от этих полей в соответствии с пирамидальным представлением информации происходит на больших угловых расстояниях, что и улучшало распознавание при меньшем числе выведенных вейвлетов.

Следует заметить, что если рассматривать величину внутрикорковых связей в миллиметрах, то в этом случае внутрикорковые связи, вероятно, остаются постоянными по длине как в корковом представительстве центра поля зрения, так и на периферии [Алексеенко и др., 1999; Gilbert, 1983]. Таким образом, полученные данные косвенно подтверждают представление о логполярном кодировании в зрительной коре.

В этой серии исследований установлено: при надпороговом контрасте восприятие инвариантно к преобразованию размера изображения, что подтверждает наши предыдущие результаты и может быть объяснено высоким отношением сигнал/шум при единичном контрасте стимула. Показано, что в случае порогового контраста вейвлетов инвариантность восприятия отсутствует, причем чем больше угловой размер изображений, тем хуже они распознаются. Это можно объяснить как результат выхода изображений за пределы фовеальной области, где вейвлеты, из ко-

торых они состоят, уже не являются оптимальными стимулами. Реакция на стимул порогового контраста оказывается ниже уровня внутреннего шума. Увеличение размеров вейвлетов при заданном размере изображения приводит к улучшению восприятия при пороговом контрасте, предположительно вследствие того, что взаимодействие рецептивных полей происходит на угловых расстояниях, пропорциональных угловым размерам этих полей.

ГЛАВА 9

МИМИКА КАК «ИНСТРУМЕНТ»

9.1. ОСНОВНЫЕ МЫШЦЫ ЛИЦА И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ МИМИКИ

Все приматы, а человек в особенности, следят за лицом собеседника, так как без понимания выражения лица невозможно общение в коллективе, в социуме. Лицо человека всегда было предметом изучения — вначале неосознанного, затем осознанного, а позднее художественного и научного. Лицо человека — это основной источник информации о его эмоциональном состоянии. У некоторых народов с малолетства, а у представителей целого ряда профессий (дипломатов, специалистов по безопасности, сотрудников разведки и даже многих обычных, не столь «романтических» профессий, например продавцов и т. д.) в результате длительных тренировок воспитывается умение делать невидимыми для постороннего взгляда выражения эмоций. Современные нейрофизиологические методы сенсорной физиологии позволяют изучать скрытые чувства.

Исследование мимических деформаций как одного из средств невербальной коммуникации чрезвычайно важно для эффективного поведения человека. Несмотря на то что это одно из интенсивно развиваемых направлений в психофизиологии, в этой сфере гораздо меньше работ, которые проводятся в области исследований механизмов слуха и речи.

Рассмотрим исследования средств невербальной коммуникации, к которым в первую очередь относится мимика. Для понимания деятельности

лицевых мышц при формировании мимики мы применили инженерный термин «синтез изображений». Под синтезом изображений понимаются напряжение определенных мышц и объединение данных напряжений в целостное изображение в гештальт, воспринимаемый оптической системой стороннего наблюдателя. Поскольку акцент в наших исследованиях сделан на лице как важнейшем (вместе с позой и походкой) средстве невербальной коммуникации, подробно будет рассмотрен и конечный продукт напряжения мышц — формирование специфического мимического паттерна — в изображении, формируемом в глазах собеседника или фотокамеры.

Мимика лица формируется, помимо рассмотренных далее лицевых мышц еще мышцами жевательными и глазодвигательными. Первые могут двигать подбородком, что значительно меняет выражение лица, а «считывание» мимики собеседника без учета движений глаз совершенно невозможно. Традиционное приветствие и пожатие руки невозможно без взгляда глаза в глаза. В данной главе указаны наименования и деятельность лицевых мышц. Лицевые мышцы построены, как и все мышцы нашего тела, по принципу оппонентности. Двигательные мышцы конечностей, «антагонисты», обеспечивают сгибание и разгибание. Аналогично и лицевые мышцы: одни сжимают глазную щель или рот — вторые их открывают, одни опускают уголки губ — другие их поднимают. Оппонентность — главный принцип их работы, без закрытия глаз мы не могли бы сохранять влажной роговицу, а без открытия мы бы не видели окружающий мир.

Рассмотрим основные мимические мышцы (рис. 9.1).

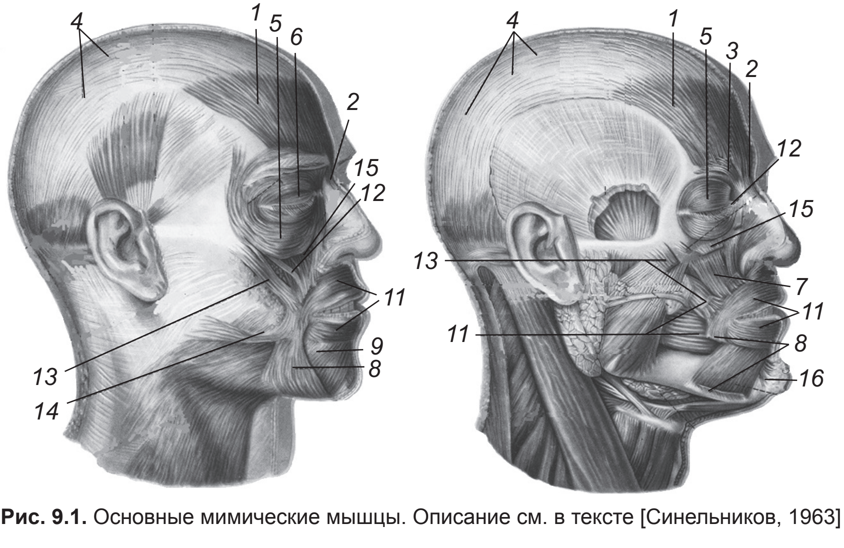


Рис. 9.1. Основные мимические мышцы. Описание см. в тексте [Синельников, 1963]

1. Лобная (фронтальная) мышца, лобный пояс, frontalis muscle (frontal belly). Иннервируется фронтальная мышца лицевым нервом. Получает кровь из супраорбитальной и супратрохлеарной артерий. По анатомической классификации фронтальная мышца является частью комплекса мышц свода черепа. В этот комплекс включают саму фронтальную мышцу, сухожильный шлем и затылочную мышцу. Фронтальная мышца имеет четырехугольную форму, она широкая, но тонкая и плотно прилегает к поверхностной фасции. Медиальные края правой и левой лобных мышц сходятся близко на некотором расстоянии выше корня носа, хотя между ними существует интервал, занимаемый сухожильным шлемом (galea aponeurotica). Величина этого интервала меняется от человека к человеку. Фронтальная мышца проходит от верхнего отдела лба, приблизительно на полпути между коронарным швом (который пересекает верх черепа) и верхним краем орбиты, прикрепляется к коже бровей. Так как она поднимает брови вверх, является антагонистом m. Orbicularis oculi. Это движение помогает при поиске слишком далеких или тусклых, малоконтрастных объектов, служит для увеличения светового потока при недостаточности света. Фронтальная мышца поднимает брови кверху, делая их дугообразными. У людей фронтальная мышца образует удивленное выражения лица. Напряжение фронтальной мышцы образует на лбу горизонтальные складки — морщины.

2. Мышца гордецов (musculus procerus). Эта мышца в виде продолговато-плоских пучков начинается на спинке носа от носовой кости и от апоневроза носовой мышцы и прикрепляется к коже надпереносья (в области глабелла), соединяется с лобной мышцей. Опуская кожу данной области книзу, вызывает образование поперечных морщин над переносицей, перпендикулярных морщинам, образуемым фронтальной мышцей.

3. Мышца, сморщивающая бровь (musculus corrugator supercilii). Относится к группе мышц, окружающих глазную щель. Иннервируется височной и скуловой ветвями лицевого нерва. Начинается от лобной кости, расположенной над слезной костью, направляется вверх по ходу надбровной дуги и прикрепляется к коже бровей. Здесь пучки мышцы переплетаются с мышечными пучками фронтальной, лобной мышцы. Важно, что это одна из трех мышц век, двигающих брови вниз и внутрь (результатом чего является «нахмуренность»). Эта мышца сближает брови и вызывает образование вертикальных морщин в межбровном промежутке над переносицей. Часто кроме вертикальных складок над переносицей образуются короткие поперечные морщины в средней трети лба, обусловленные одновременным действием лобной мышцы. Такое положение бровей бывает при страдании, боли и характерно для тяжелых душевных переживаний.

4. Сухожильный шлем, соединяющий лобную и затылочную мышцы (musculi occipitofrontalis).

5. Круговая мышца орбиты глаза (musculus orbicularis oculi). Круговая мышца орбиты располагается под кожей, прикрывающей передние отделы глазницы. В круговой мышце различают три части: глазничную, вековую и слезную. Все три части мышцы берут начало в области медиального угла глаза. Глазничная часть (pars orbitalis) начинается от lig. Palpebrale mediale, лобного отростка верхней челюсти, носовой части лобной кости и следует вдоль верхнего и нижнего краев глазницы, образуя мышечное кольцо. Внутренние пучки мышцы в области lig. Palpebrale laterale образуют латеральный шов век (raphe palpebralis lateralis). Вековая часть (pars palpebralis) является продолжением глазничной части и располагается непосредственно под кожей век. В ней, в свою очередь, выделяются две части — верхняя и нижняя (paries palpebrales superior et inferior). Они начинаются соответственно от верхнего и нижнего краев, lig. Palpebrale mediale, и направляются к латеральному углу глаза, где прикрепляются к lig. Palpebrale laterale. Слезная часть (pars lacrimalis) начинается от заднего гребня слезной кости и делится на две части, которые охватывают спереди и сзади слезный мешок и теряются среди мышечных пучков вековой части. Снаружи слезная часть мышцы не видна. Вековая часть смыкает веки. Глазничная часть при сильном сокращении производит зажмуривание глаза. Слезная часть расширяет слезный мешок и влияет на отведение слезной жидкости через слезные канальцы. Круговые мышцы орбиты глаза закрывают глаза (единственный способ сделать это). Леватор palpebræ superioris является прямым антагонистом этой мышцы; он поднимает верхнее веко и открывает глаза. Патология лицевого нерва, наблюдаемая при параличе Белла, приводит к невозможности мигать или закрывать ипсилатеральное веко, что увеличивает риск воспаления роговицы и появления язв. Вековая часть мышцы действует непроизвольно, закрывая веки во сне или при мигании; орбитальная часть круговой мышцы орбиты глаза подвергается сознательному контролю. Когда вся мышца приводится в действие, кожа тянется к медиальному углу орбиты, а веки плотно закрыты, как при фотофобии. Кожа собирается в складки, эти складки становятся постоянными морщинами в старческом возрасте и образуют так называемые вороньи ноги. Орбитальная и пальпебральная части могут работать независимо друг от друга.

6. Мышца, поднимающая верхнее веко (levator palpebrae superioris muscle), — это мышца орбиты, которая поднимает верхнее веко. Как и в случае с большинством мышц орбиты, получает соматический моторный вход от окуломоторного нерва. Прилегающая гладкая мускулатура отдельно иннервируется симпатическими волокнами. Нарушения иннервации

приводят к птозу. Управление идет черепно-мозговыми нервами и симпатической иннервацией. Роговичный рефлекс и закрывание век можно проверять у людей и в бессознательном состоянии.

7. Мышца, поднимающая угол рта (musculus levator anguli oris), располагается под мышцей, поднимающей верхнюю губу, и большой скуловой мышцей. Берет начало от fossa canina ниже подглазничного отверстия и прикрепляется к углу рта. Тянет угол рта вверх.

8. Мышца, опускающая угол рта (musculus depressor anguli oris). Начинается эта мышца широким основанием от передней поверхности нижней челюсти, ниже подбородочного отверстия. Направляется вверх, суживается, достигает угла рта, где часть ее пучков вплетается в кожу в углу рта, в толщу верхней губы и в мышцу, поднимающую угол рта. Мышца тянет вниз угол рта и делает носогубную складку прямолинейной. Опускание углов рта придает лицу выражение печали.

9. Мышца, опускающая нижнюю губу (musculus depressor labii inferioris), несколько прикрыта мышцей, опускающей угол рта. Начинается от передней поверхности нижней челюсти, над началом предыдущей мышцы, кпереди от подбородочного отверстия, направляется вверх и вплетается в кожу нижней губы и подбородка. Медиальные пучки этой мышцы у нижней губы переплетаются с такими же пучками одноименной мышцы противоположной стороны. Оттягивает нижнюю губу вниз и несколько латерально, что, в частности, наблюдается при выражении отвращения.

10. Щечная мышца (musculus buccinator) начинается от нижней трети переднего края ветви нижней челюсти, в области альвеол больших коренных зубов. Направляется вперед. Волокна щечной мышцы вплетаются в круговую мышцу рта, а также в слизистую оболочку и кожу угла рта, верхней и нижней губ. Оттягивает углы рта в стороны, прижимает щеки к зубам, сжимает щеки, предохраняет слизистую оболочку ротовой полости от прикусывания при жевании. Иннервация осуществляется лицевым нервом, buccal branch. Самые верхние и самые нижние волокна буккатора проходят через губы из стороны в сторону.

11. Круговая мышца рта, orbicularis oris muscle, kissing muscle (musculus orbicularis oris). У человека мышца orbicularis oris представляет собой комплекс мышц в губах, окружающих рот. Иннервация осуществляется лицевым нервом. Эта мышца закрывает рот и сжимает губы, когда сфинктер сжимается. Orbicularis oris — это не простой сфинктерный мускул, как orbicularis oculi; он состоит из многочисленных слоев мышечных волокон, окружающих отверстие рта, но имеющих различное направление. Состоит частично из волокон, полученных из других лицевых мышц, которые вставляются в губы, и частично из волокон, соответствующих губам.

Сфинктер состоит из четырех независимых частей, которые чередуются и только придают вид округлости. При сокращении периферической части круговой мышцы рта губы стягиваются и выдвигаются вперед (при поцелуе), когда же сокращается часть, лежащая под красной каймой губ, то губы, плотно сближаясь между собой, заворачиваются внутрь, вследствие чего красная кайма скрывается. Круговая мышца рта, располагаясь вокруг рта, выполняет функцию жома (сфинктера), то есть мышцы, закрывающей отверстие рта. В этом отношении она является антагонистом радиальным мышцам рта, то есть мышцам, расходящимся от него по радиусам и открывающим рот. Постоянные поцелуи порождают легкую морщинку вокруг проекции этой мышцы, на коже даже молодых людей образуется складка поцелуев. Эта мышца закрывает рот и сжимает губы при психическом напряжении, если человек сосредоточен на выполнении цели; когда сжимается, образуются складки вокруг рта, но дальше к периферии по сравнению со складкой поцелуев. С годами эта складка превращается в так называемые волевые морщины.

12. Малая скуловая мышца (musculus zygomaticus minor) начинается от передней поверхности скуловой кости. Медиальные пучки этой мышцы переплетаются с мышечными пучками круговой мышцы глаза. Мышца вплетается в кожу носогубной складки, которую углубляет при сокращении. Формирует морщину носогубной складки.

13. Большая скуловая мышца (musculus zygomaticus major) начинается от наружной поверхности скуловой кости. Часть мышечных пучков являются продолжением круговой мышцы глаза. Направляясь вниз и медиально, скуловая мышца вплетается в круговую мышцу рта и кожу угла рта. Оттягивает угол рта кверху и латерально, причем носогубная складка сильно углубляется. При таком действии мышцы лицо становится смеющимся. Тянет верхнюю губу вверх и латерально, углубляя носогубную складку, которая превращается с годами в морщину.

14. Мышца смеха (musculus risorius) непостоянная, частично является продолжением пучков подкожной мышцы шеи; часть пучков мышцы берет начало от жевательной фасции и кожи области носогубной складки. Направляясь в медиальную сторону, ее мышечные пучки вплетаются в кожу угла рта, а часть — в толщу верхней губы и мышцу, поднимающую угол рта. Растягивает рот при смехе. У некоторых людей вследствие прикрепления мышцы к коже щеки при ее сокращении образуется ямочка сбоку от угла рта.

15. Мышца, поднимающая верхнюю губу и крыло носа (musculus levator labii superioris alaequae nasi), располагается рядом с мышцей, поднимающей верхнюю губу. Начинается от основания лобного отростка верхней челюсти. Заканчивается в области крыла носа. При сокращении подни-

мает верхнюю губу, углубляя носогубную складку. Тянет крыло носа кверху, расширяя ноздри.

16. Подбородочная мышца (musculus mentalis) начинается рядом с мышцей, опускающей нижнюю губу от альвеолярного бугорка резца нижней челюсти, направляется вниз и вплетается в кожу подбородка. Поднимает кверху кожу подбородка (в результате на ней образуются ямочки) и приподнимает нижнюю губу, придавливая ее к верхней.

17. Носогубная мышца (nasolabialis) соединяет верхнюю губу с задней частью перегородки носа. Поднимает верхнюю губу.

18. Участок (philtrum), видимый на верхней губе под перегородкой носа. Его форма и размер определяют тип лица; тесно связан с мимикой.

19. Мышцы, выдвигающие нижнюю челюсть и участвующие в акте речи (также работают при жевании), это латеральные крыловидные мышцы (m. Pterygoideus lateralis). Их две, при двустороннем сокращении они выдвигают нижнюю челюсть вперед, а при сокращении одной из них происходит смещение нижней челюсти в сторону, противоположную сокращению. Антагонизм и синергизм этих мышц обеспечивают плавные движения нижней челюсти. При говорении (устной речи) связаны с мимикой.

Мимические мышцы, причастные к звукообразованию (участвующие в речевой артикуляции), располагаются вокруг рта. Рассмотрим их назначение. Круговая мышца рта (m. Orbicularis oris) суживает ротовую щель и вытягивает губы вперед. Мышца, поднимающая верхнюю губу (m. Levator labii superioris), не только поднимает верхнюю губу, но и подтягивает крыло носа. Она начинается тремя пучками: от лобного отростка, от нижнеглазничного края верхней челюсти и от передней поверхности скуловой кости. Мышца, опускающая нижнюю губу (m. Depressor labii interioris), тянет нижнюю губу книзу. Щечная мышца (m. Buccinators) оттягивает угол рта в сторону, а при двустороннем сокращении растягивает ротовую щель и прижимает внутреннюю поверхность щек к губам. Большая скуловая мышца (m. Zygomaticus major) тянет угол рта вверх и кнаружи. Мышца, поднимающая угол рта (m. Levator anguli oris), тянет угол рта вверх и наружу. Мышца, опускающая угол рта (m. Depressor anguli oris), тянет угол рта вниз и наружу. Мышца смеха (m. Risorius) тянет угол рта латерально. Подбородочная мышца (m. Mentalis) тянет кожу подбородка вверх и вытягивает нижнюю губу. Резцовая мышца верхней губы (m. Incisivus labii superioris) вплетается в кожу угла рта и его круговую мышцу, тянет угол рта вверх и внутрь. Резцовая мышца нижней губы (m. Incisivus labii inferrioris) тоже вплетается в круговую мышцу рта, кожу нижней губы и тянет нижнюю губу вниз. В мимике участвует и нижний отдел носа благодаря пучку нежных мышц, которые крепятся к коже в области крыльев носа, перегородки

и кончика носа (m. Levator, compressor, depressor alae nasi, m. Depressor septi obile nasi).

Лицо — тот «инструмент», на котором человек «играет музыку» страсти; она проявляется в напряжениях мышц «исполнителя». Зачастую они неосознаваемы самим «исполнителем», опытный исследователь с помощью современных технологий может их измерить и даже рассказать о содержании «пьесы». Спустя годы напряжения мышц фиксируются на лице в виде специфического узора морщин, своеобразной карты прожитой жизни, прошедших размышлений, сомнений, борьбы и тревог.

Мы рассмотрели лишь основные и наиболее важные для понимания структуры мимики человека мышцы. К ним можно было бы добавить шесть глазодвигательных, две мышцы, управляющие размером зрачка, две жевательные, мышцы носа. Заметим, что есть около сорока действующих мышц только на одной стороне лица; для левой и правой сторон лица это восемьдесят, причем левая и правая стороны не всегда работают симметрично, не всегда все мышцы работают одинаково. Тем не менее природа дала человеку инструмент синтеза сложных изображений. Даже если мышцы могут принимать только два положения (напряжена или расслаблена), число возможных комбинаций, состояний, формируемых этими мышцами для двух век, двух глазных яблок со зрачками, носа, губ, щек, лба и подбородка, становится поистине астрономическим.

Сравним возможности лица по синтезу изображений с музыкальными инструментами — с роялем или фортепиано, уступающими по диапазону только органу. Звуковой диапазон фортепьяно вначале состоял из пяти октав (шестьдесят одна клавиша), затем был расширен до шести с половиной октав (семьдесят восемь клавиш, а на сегодняшний день целых восемьдесят восемь — пятьдесят две белых и тридцать шесть черных). Между первой и последней клавишами — семь полных октав. Это результат длительного «превращения» монохорда, имевшего еще у пифагорейцев преимущественно познавательное значение музыкальной картины мира и породившего четырехструнные инструменты времен Птолемея, затем цимбалы, а потом тридцати-сорокаструнный клавесин и, наконец, клавесин Кристофори, играющий форте и пьяно (громко и тихо). Так и на лице — можно сыграть любую мелодию, от простой на одной струне до музыкальной пьесы на рояле в семь октав. Голос человека перекрывает обычно три-четыре октавы. Можно ли увидеть эту игру мышц лица стороннему наблюдателю? Иногда да, иногда нет. Есть ли способы и инструменты, с помощью которых можно «читать» мышцы лица при невидимых обычных глазам напряжениях лицевых мышц? Попробуем дать ответ на этот вопрос.

9.2. МИКРОТРЕМОР МЫШЦ КАК МАРКЕР НЕОСОЗНАВАЕМЫХ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ

Особый интерес представляет измерение эмоционального значения сенсорных сигналов разной модальности по двигательному ответу. Эти исследования имеют долгую историю. Еще в XIX столетии в Вене психиатры разработали приемы оценки врачом дрожания рук пациента при задавании ему вопросов, имеющих какое-либо отношение к исследуемой ситуации, следовательно, вызывающих пусть даже слабую, но эмоциональную реакцию. Этот прием оказался столь надежным, что даже широко использовался в публичных представлениях. Яркий представитель венской школы Вольф Мессинг — знаменитый иллюзионист, в интервью корреспонденту журнала «Техника — молодежи» П. Орешкину в 1961 году дал откровенное объяснение своим психологическим опытам: «Это не чтение мыслей, а, если так можно выразиться, “чтение мускулов”. Когда человек напряженно думает о чем-либо, клетки головного мозга передают импульсы всем мышцам организма. Их движения, незаметные простому глазу, мною легко воспринимаются. Допустим, что, выполняя задание, я в какой-то момент совершаю ошибку. И тут же индуктор совершенно бессознательно, помимо своей воли, “сообщит” мне об этом. Его рука окажет неуловимое сопротивление, и нужно обладать большой чувствительностью, чтобы воспринять это напряжение. Я часто выполняю мысленные задания без непосредственного контакта с индуктором и даже с завязанными глазами. Здесь указателем мне может служить частота дыхания индуктора, биение его пульса, тембр голоса, характер походки и т. д. То, что мои глаза завязаны, больше всего действует на аудиторию. Мне же работать с завязанными глазами даже удобнее: я лучше сосредоточиваюсь. Такова в принципе моя методика “чтения мыслей”» [Орешкин, 1961]. Мессинг охотно делился своими знаниями с нами, студентами Львовского медицинского института в 60-е годы прошлого века (некоторые из наших преподавателей были друзьями его молодости), но его методы требовали многих лет непрерывных занятий, недоступных по количеству свободного времени для молодых врачей. По трудоемкости его умение можно сравнить с умением китайских врачей старой школы различать сотни оттенков пульса. Едва ли неподготовленный реципиент может сосредоточиться так, чтобы правильно ощущать дрожания рук пациентов — «индукторов» или понимать нюансы колебания пульса. Но в настоящее время для этого используются цифровые технологии.

Существуют разные физиологические методы оценки эмоциональных и когнитивных различий в восприятии одинаковых семантических объек-

тов с разным когнитивным и эмоциональным значением. Они имеют свои достоинства и недостатки. В Лаборатории физиологии зрения Института физиологии имени И. П. Павлова РАН (А. К. Хараузовым, С. В. Прониным, П. П. Васильевым, Ю. Е. Шелепиным) был разработан метод психофизического анализа эмоций в задачах принудительного выбора и регистрации электромиограммы лицевых мышц.

Для изучения влияния разных эмоционально-сигнальных значений на реакции, связанные с семантическим значением объекта (подпороговое и надпороговое предъявление), и объективной оценки эмоциональных реакций испытуемых использовали метод регистрации электромиограммы (ЭМГ) некоторых лицевых мышц, ответственных за выражение эмоций. Проанализировали электрическую активность следующих лицевых мышц (рис. 9.2): zygomaticusmajor — растягивает углы рта, активируется, когда человек улыбается; corrugatorsupercilii — сдвигает брови внутрь, активируется, когда человек хмурится; m. Frontalis — поднимает брови наверх, активируется, когда человек удивлен.

Электрическую активность мышц регистрировали биполярно, располагая пару электродов вдоль мышцы, напряжение которой соответствует определенному выражению лица [Fridlund, 1986]. Расстояние между электродами составляло 1 см, полоса пропускания усилителей была выбрана от 20 до 120 Гц с включенным режекторным фильтром 45–55 Гц от сетевых наводок. Нижняя граница полосы 20 Гц была выбрана для исключения артефактов, связанных с движениями глаз и морганиями. Электроды располагали на левой стороне лица испытуемого, заземляющий электрод закрепляли на мочке правого уха.

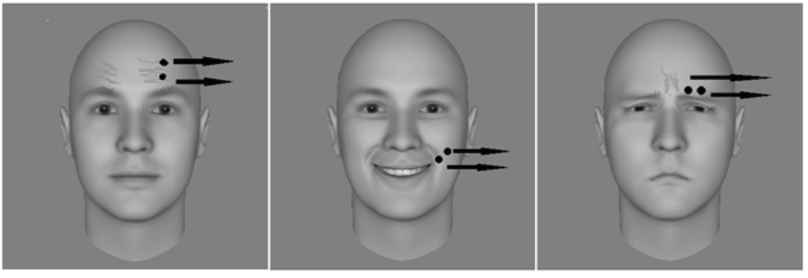


Рис. 9.2. Схематичное расположение электродов, регистрирующих активность некоторых лицевых мышц. Наверху название мышцы, которые отражают (слева направо) удивление, улыбку и хмурость. Напряжение мышц позволяет оценить даже неосознанные испытуемым реакции, которые не выражены в мимике, доступной постороннему наблюдателю

Анализ миограммы осуществляли различными способами в зависимости от условий стимуляции, определяемых задачей исследования. В случае, когда испытуемый рассматривает одну или несколько однотипных картинок, рассчитывали спектр регистрируемой миограммы и анализировали его суммарную мощность во всем регистрируемом в этой работе частотном диапазоне (20–120 Гц) за все время записи. Верхнюю граничную частоту определяла частота дискретизации сигнала имеющимся у нас тогда цифровым энцефалографом (запись более чем десятилетней давности, когда энцефалографы в лаборатории имели частоту дискретизации всего лишь 250–500 Гц, затем частота дискретизации нового энцефалографа значительно выросла).

Регистрация ЭМГ позволяет зафиксировать изменения в лице человека, даже если внешне он выглядит спокойным. Это становится возможным потому, что электромиограмма фиксирует не только сокращения мышц, приводящих к внешним изменениям выражения лица, но и фиксирует изменение тонуса лицевых мышц (как напряжение, так и расслабление), что внешне незаметно.

Подтверждение этому — сравнительные исследования, когда испытуемому на одну минуту последовательно предъявляли фотографии людей с различным выражением лица: веселым, грустным, нейтральным. Во время просмотра фотографий у испытуемого фиксировали активность мышц zigomaticus (улыбка) и corrugator (хмурость) Видеокамера фиксировала изменения выражения лица испытуемого для сравнения возможностей известной программы FaceReader и метода ЭМГ в оценке эмоционального состояния человека.

Программа FaceReader автоматически проводила анализ выражения лица испытуемого при наблюдении разных тестовых изображений эмоций. FaceReader автоматически разделяет выражение лица на шесть базовых состояний за время анализа: нейтральное выражение лица, счастье, грусть, злость, удивление и страх.

В проведенных в нашей лаборатории исследованиях при просмотре трех типов картинок у испытуемых доминирует нейтральное выражение лица. Судя по шкалам ординат, отражающим степень выраженности каждой эмоции, превышение нейтрального выражения лица над другими эмоциями составляет десятки и сотни раз. Достоверной связи получаемых результатов, а именно изменения мимики испытуемых в соответствии с предъявляемыми на тестовых изображениях эмоциями по данным программы FaceReader, не наблюдается.

В то же время с помощью миографии лицевых мышц удалось точно определить, на какие тестовые изображения — фотографии с веселым, либо с грустным, либо с нейтральным выражением лица — смотрел испытуемый.

На рис. 9.3 представлен пример записи ЭМГ у одного испытуемого с выраженной реакцией лицевых мышц на предъявление эмоциональных стимулов. Стрелками показан момент предъявления «грустной» и «веселой» фотографии, после которого в соответствующей мышце развивается ответ в виде увеличения амплитуды и частоты колебаний.

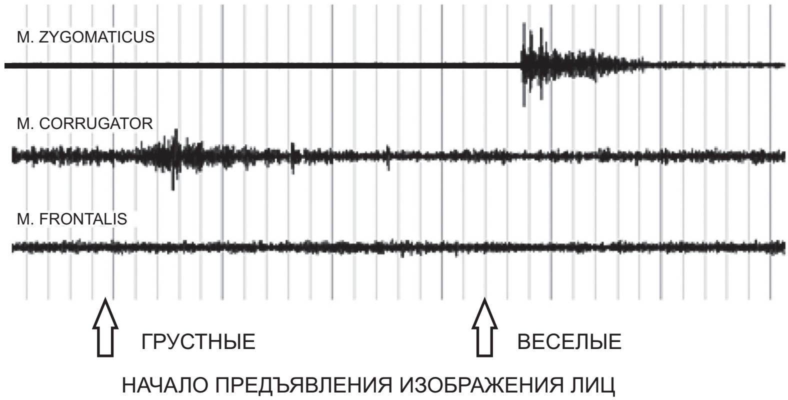


Рис. 9.3. Участок записи ЭМГ у одного испытуемого с ярко выраженной реакцией лицевых мышц на предъявление стимулов — изображений лиц с выраженными эмоциями

Измеряли мощность спектров миограмм (рис. 9.4).

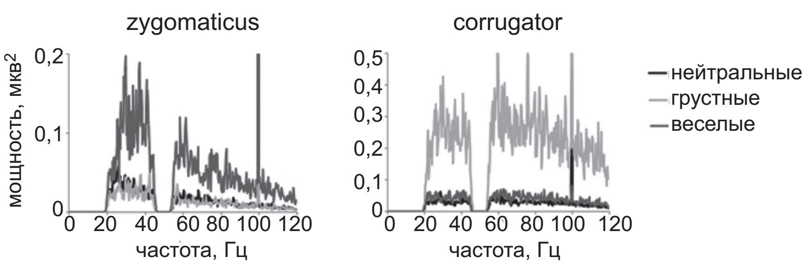


Рис. 9.4. Спектры миограммы мышц *zygomaticus* (улыбка) и *corrugator* (хмурость) во время просмотра испытуемым нейтральных, веселых и грустных картинок

Как видно из рис. 9.3 и 9.4, мышцы, ответственные за улыбку, в несколько раз увеличивают свою электрическую активность при просмотре испытуемым веселых картинок относительно состояния, когда испы-

туемый смотрит на нейтральные и грустные картинки. Подобным образом увеличивается электрическая активность мышцы, сдвигающей брови внутрь (когда человек хмурится), при просмотре испытуемым грустных картинок. Активность при этом увеличивается в 5–6 раз по сравнению с активностью при просмотре испытуемым нейтральных и веселых картинок. Это были неосознаваемые реакции на осознаваемые зрительные стимулы. Напряжение этих мышц было скрытым для внешнего просмотра. Но они напрягались. Поэтому анализ электромиограммы лицевых мышц оказался высокочувствительным и объективным методом оценки эмоционального состояния человека по сравнению с методами, основанными на анализе внешних признаков. Более того, анализ электромиограммы пока является гораздо чувствительнее по сравнению с методами регистрации ВП головного мозга и анализа вариабельности сердечного ритма.

Для исследования различий осознаваемого и неосознаваемого восприятия изображений лиц с эмоциональным выражением применили набор черно-белых фотографий мужских и женских лиц, выражающих различные эмоции. Фотографии компоновали в матрицы 2×2 четырех лиц. Матрицы могли содержать как женские, так и мужские лица с одной и той же эмоцией. Каждая матрица из четырех фотографий содержала лишь один тип эмоций: веселые, грустные или нейтральные. Эти матрицы-стимулы были названы эмоциональными матрицами. В качестве маскировочного сигнала, для создания условий неосознанного восприятия, использовали матрицу, состоящую из случайных фрагментов, взятых из нейтральных матриц. Затем после серии маскировочных и эмоциональных матриц предъявляли тестовые матрицы. В тестовом изображении испытуемый должен был оценить доминирование в матрице изображения лица с веселой или грустной эмоцией. Всего было создано сорок вариантов матриц, относящихся к нейтральному типу, сорок матриц изображений лица веселого типа, сорок матриц грустного типа. Еще было восемь вариантов маскировочных матриц. Применяли разное подпороговое и надпороговое время предъявления для неосознаваемых и осознаваемых стимулов. Меняли длительность предъявления матрицы со стимульными изображениями разных эмоций и матриц маскировочных.

Предъявление начинали с последовательности двух маскировочных матриц, затем предъявляли одну «эмоциональную матрицу», затем опять две маскировочные, потом аналогичные комбинации, но уже с другими матрицами. Этими комбинациями достигалась максимальная маскировка тестовых изображений с лицами. Эффект маскировки был усилен инструкцией смотреть на точку фиксации в центре экрана. Неосознанное предъявление меняло эмоциональное состояние испытуемого в зависимости от эмоционального выражения лиц на предъявляемых фотографиях.

Вся длительность последовательности из маскировочных и эмоциональных матриц при осознанном и неосознанном предъявлении была одинакова. При неосознаваемом предъявлении длительность маскировочной матрицы была больше, чем длительность предъявления тестовой матрицы. В исследованиях с осознаваемым предъявлением длительность маскировочной матрицы была короче длительности предъявления тестовой матрицы. Соотношение времени предъявления эмоциональной и маскировочной матриц было подобрано так, чтобы в случае неосознанного предъявления исключить возможность заметить вставку с эмоциональной матрицей. А во время предъявления эмоциональной матрицы в случае осознанного предъявления времени было достаточно для того, чтобы испытуемые могли увидеть лица и легко определить знак эмоции в изображении. На это необходимо обратить внимание, так как выбранный диапазон легко проверить и он демонстрирует опасность нежелательных вставок в вещательном телевидении и в Интернете. Длительность наших вставок варьировала от 40 до 10 мс, что перекрывает весь диапазон вещательного телевидения и бытовых мониторов.

После окончания предъявления последовательности маскировочных и эмоциональных матриц экран в течение одной секунды оставался черным, затем появлялась тестовая матрица с нейтральными лицами. Задачей испытуемого было оценить по методу принудительного выбора, к какому эмоциональному типу принадлежит данная матрица — веселому или грустному, и нажать соответствующую кнопку. Такой вопрос предлагали испытуемым для того, чтобы определить степень влияния предшествующих эмоциональных стимулов на эмоциональное восприятие нейтральных лиц. Сразу после нажатия испытуемым на кнопку экран становился черным, и через некоторое время начиналась новая последовательность матриц. Всего за время исследования накапливали по пятьдесят два ответа на предъявление последовательностей, содержащих матрицы веселого типа, по пятьдесят два ответа на последовательности из матриц грустного типа и столько же на матрицы нейтрального типа. В работе участвовали двенадцать испытуемых, мужчин и женщин в возрасте 20–30 лет. Каждый испытуемый участвовал в двух экспериментах — сначала вариант с неосознанным предъявлением эмоциональных стимулов и после короткого отдыха — вариант с осознанным предъявлением. Регистрировали ЭЭГ по двадцати отведениям, расположенным по всей голове по системе 10–20, ЭМГ с мышц zygomaticus (улыбка), corrugator (хмурость), и анализировали изменение размера зрачка.

Миограмму анализировали с помощью специальной программы, созданной в нашей лаборатории и обеспечивающей построение низкочастотной огибающей по высокочастотному сигналу. Созданная С. В. Про-

ниным программа позволяла проводить расчет изменений ЭМГ в заданных временных интервалах в зависимости от эмоционального знака стимула относительно синхросигнала о начале предъявления и типе стимула, подаваемого со стимулирующего компьютера на компьютер регистрирующий. В каждом временном интервале, длительностью несколько секунд, рассчитывали стандартное отклонение сигнала ЭМГ в окне анализа 1000 мс. Расчет начинали за 500 мс до предъявления стимула, затем окно анализа сдвигали на один отсчет (2 мс) вправо. Эта процедура повторялась до конца исследуемого временного интервала. В результате мы получали кривую, отражающую изменения во времени суммарной мощности ЭМГ относительно момента предъявления стимула. Затем такие ответы ЭМГ сортировали по типу стимула и усредняли, подобно тому как усредняют ВП в ЭЭГ. Для исключения артефактов из дальнейшего усреднения рассчитывали стандартное отклонение по всей записи ЭМГ. Затем устанавливали порог в три сигмы и эмпирическим путем подбирали максимальное число точек, превышающих заданный порог. Пробы, не удовлетворяющие заданным условиям, автоматически отбрасывались.

На рис. 9.5 показаны усредненные по тринадцати испытуемым (возраст которых 20–25 лет) данные изменений электрической активности мышц zygomaticus (улыбка) в ответ на предъявление фотографий, содержащих

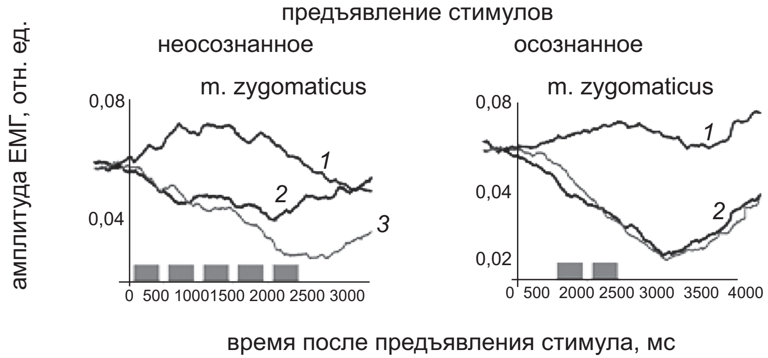


Рис. 9.5. Электрические реакции мышцы улыбки — zygomaticus — в ответ на осознанное и неосознанное восприятие разных лиц с разными эмоциями. Видно, что мышца улыбки активирована только при восприятии как осознанном, так и неосознанном фотографий, содержащих веселые лица (кривая *1*). При предъявлении фотографий грустных лиц (кривая *2*) и нейтральных (кривая *3*) амплитуда ответа падает. Отличия значимы (парный непараметрический *t*-критерий, P < 0,05). Значимость различий считали для каждых 500 мс записи по всей эпохе анализа, равной четырем секундам

веселые, грустные либо нейтральные лица. Слева представлены результаты измерений в условиях неосознанного восприятия эмоциональных стимулов, справа — в условиях осознанного восприятия. Ось ординат пересекает ось абсцисс в момент предъявления стимула. Реакция на веселые лица изображена линией 1, реакция на грустные лица — линией 2.

Каждый столбик (рис. 9.5) означает, что расхождение кривых, усредненных по тринадцати испытуемым, статистически значимо в интервале 500 мс. Из представленной иллюстрации видно, что мышца улыбки (zygomaticus) как при осознанном, так и при неосознанном предъявлении изображений лиц с эмоциональным выражением увеличивает тонус в ответ на предъявление веселых фотографий и уменьшает тонус в ответ на предъявление грустных. При неосознанном восприятии изображения это расхождение даже более значимо. Тем самым по отклику даже одной мышцы можно различить неосознанную реакцию мозга на радостные и грустные лица. Но грустные и нейтральные различить нельзя. Вероятно (в результате работы зеркальных нейронов), испытуемые стремятся улыбнуться в ответ на предъявление веселых изображений и, наоборот, улыбка сходит с их лица при предъявлении грустных, даже в условиях неосознаваемого восприятия. Нейтральные лица в стимулах вызывают ответы, аналогичные ответам на грустные лица, как в случае осознанного, так и в случае неосознанного предъявления. Это связано с тем, что нейтральные лица — это ситуация неопределенности, которую, вероятнее, выгодно считать изображением грустным или агрессивным.

Рассмотрим отклик трех мышц, полученных в этих исследованиях zygomaticus, corrugator и frontalis. Набор фотографий был условно разделен на две группы: вызывающие положительные эмоции (далее — веселые) и вызывающие отрицательные эмоции (далее — грустные). В каждой группе было по пятнадцать картинок. Фотографии из каждой группы предъявляли на экране в случайном порядке на две секунды, после чего замещали серым фоном на пять секунд. Затем появлялась следующая фотография и т. д. Всего за время эксперимента накапливали по сорок пять ответов на предъявление фотографий веселого типа и по сорок пять ответов на предъявление фотографий грустного типа. Задачей испытуемых было спокойно рассматривать изображения. О целях исследования и назначении электродов испытуемым ничего не сообщали.

На рис. 9.6 показаны усредненные по всем испытуемым данные изменений электрической активности мышц zygomaticus (улыбка), corrugator (хмурость) и m. Frontalis (удивление) в ответ на предъявление фотографий двух групп — веселые и грустные. Ось ординат пересекает ось абсцисс в момент предъявления стимула. Серая линия — реакция на веселые картинки, черная линия — реакция на грустные картинки.

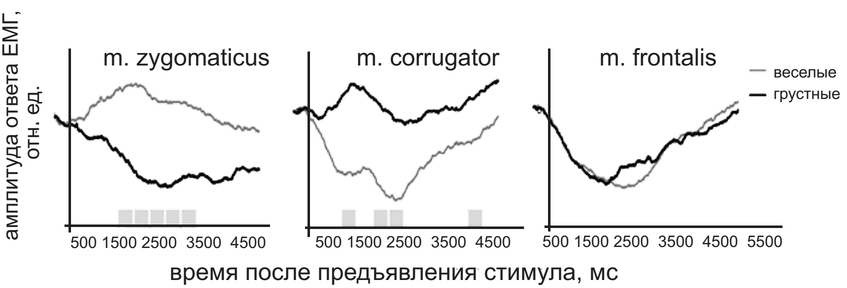


Рис. 9.6. Электрические реакции трех мимических мышц: улыбки (zygomaticus), хмурости (corrugator) и удивления (frontalis) во время осознаваемого восприятия испытуемыми двух типов картинок — веселых (серая кривая) и грустных (черная кривая). Прямоугольники внизу означают, что амплитуда ответа на веселые и грустные картинки значимо различается (парный непараметрический *t*-критерий, $P < 0,05$). Значимость различий считали для каждых 500 мс записи по всей эпохе анализа, равной шести секундам

Из представленной иллюстрации следует, что при предъявлении на короткое время испытуемым веселых картинок мышца улыбки (zygomaticus) увеличивает тонус относительно фонового участка, предшествующего стимулу, и наоборот, уменьшает тонус при просмотре грустных картинок. Расхождение начинается через 500 мс после предъявления стимула, однако значимым становится только через полторы секунды и длится в течение нескольких секунд. Каждый серый столбик означает, что расхождение кривых статистически значимо в интервале 500 мс. Мышца хмурости (corrugator) увеличивает свой тонус при предъявлении испытуемым грустных картинок и уменьшает тонус при предъявлении веселых картинок. Так же как и у мышцы улыбки, расхождение между ответами на веселые и грустные картинки начинается через 500 мс после предъявления стимула и наблюдается на всем протяжении записи. Мышца удивления (frontalis) одинаковым образом реагирует на предъявление фотографий из обеих групп. Следует отметить, что не все испытуемые показывали одинаковый результат. У некоторых испытуемых регистрировали выраженные изменения только одной мышцы, у некоторых — только другой, что, видимо, обусловлено индивидуальными особенностями.

Проведенный анализ результатов этих исследований позволяет утверждать, что мышцы zygomaticus и corrugator находятся в совершенно особых оппонентных отношениях. Это не реципрокность сгибателей и разгибателей руки, мышц, сжимающих глазную щель или открывающих глаза. По нашему мнению, это оппонентность более высокого уровня, связанная с отражением семантики изображения и требующая соответствующей дви-

гательной реакции у наблюдателя в схожих ситуациях на различных этапах биологического или социального развития. На лице, на этом сложном «инструменте», разыгрывается «пьеса», как на фортепьяно; в лице происходит напряжение мышц в ответ на осознанный или даже неосознанный стимул. Например, при предъявлении грустных картинок помимо повышения тонуса m. Corrugator наблюдается снижение тонуса m. Zygomaticus (улыбка сходит с лица), и наоборот. Причем на неосознанный стимул реакция вполне адекватная и согласованная со стимулом.

Это означает, что неосознанный стимул не является невидимым. Этот стимул невидим осознанно, но его видят и обрабатывают в мозгу структуры, предназначенные для восприятия подобного рода стимулов. Этими стимулами являются быстро движущиеся объекты или мелькающие сигналы высокой временной частоты и передающие пространственную низкочастотную информацию. Именно этот тип предъявления характерен для нашего периферического зрения, когда мы проходим по незнакомой местности, а потом возвращаемся обратно правильно. Мозг запомнил большей частью неосознанно грубое низкочастотное описание изображений по нашей дороге. Попытки вмешаться в восстановление правильного пути аналитически не всегда приводят к желаемому результату. Этим неосознанным описанием значительно лучше владеют многие животные. Следует заметить, что здесь мы говорим только о роли зрительных изображений, сигналов, участвующих в построении картины мира.

Нейроны координатной сетки пространства, или grid cells (клетки, о которых идет речь, в русскоязычной терминологии именно сетки, а не решетки; в английской научной литературе обычно решетка — это grating). Нейроны координатной сетки — один из видов нейронов в энторинальной коре головного мозга млекопитающих. Нейроны координатной сетки пространства активируются, когда животное (или человек) пересекает узлы воображаемой координатной сетки реального пространства, в котором оно находится. Нейроны координатной сетки пространства образуют гексагональную матрицу. Вместе с нейронами места, нейронами направления головы, нейронами границы и нейронами скорости нейроны координатной сетки пространства входят в систему, которая обеспечивает пространственную ориентацию животного (рис. 9.7 Б). В 2014 году Эдварду Мозеру, Мей-Бритт Мозер и Джону О'Кифу за изучение нейронов координатной сетки пространства и нейронов значимого для животного места-пространства была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине.

В отличие от нейронов места в гиппокампе нейроны координатной сетки пространства имеют множественные области возбуждения с регулярными интервалами, которые разбивают всю окружающую среду животного на гексагональную структуру с переменным шагом. Здесь вновь, как

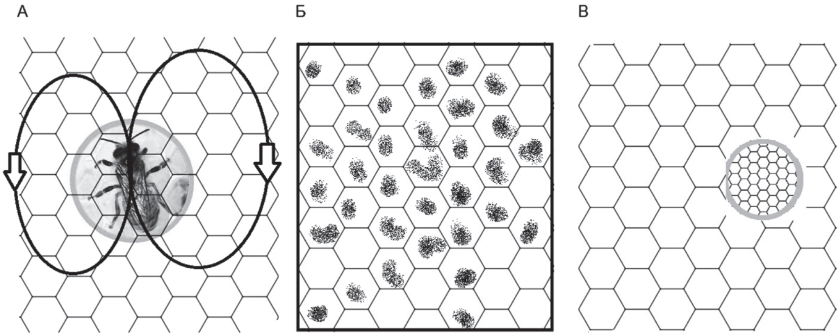


Рис. 9.7. А — схема гексагональной сетки сот и танец пчел по Карлу Фришу с указанием места расположения сбора меда; Б — схема лотка с условной гексагональной сеткой, отражающей описание пространства в нейронной сети координатной сетки пространства (*grid*-нейрона), точки отражают частоту появления животного на поверхности лотка; В — низкочастотная сеть зрительной системы, дающая постоянное глобальное описание окружающего пространства — сцены и относительно нее подвижная фовеа (высокочастотная сеть), выделяющая локальные объекты

в первичной зрительной системе, мы видим пирамидальную организацию рекуррентных структур.

Возвратимся к нашей тематике. Грубое низкочастотное описание сцены может легче смешиваться с другими описаниями других естественных сцен. В результате при повышении внутреннего шума (а он выше в низкочастотной области) низкочастотное описание сцены может играть и злую шутку, вызывая синдром уже виденного — дежавю (фр. Déjà vu). Низкочастотные пространственные описания многих сцен очень похожи друг на друга. Если нет привязки — легко ошибиться. Общая физиологическая основа многоканальной организации зрительной системы таким образом объясняет этот синдром, если он возникает у здоровых людей; при патологии на это наслаиваются добавочные факторы, в частности внутренний шум разных отделов мозга.

Но хорошая сторона грубого низкочастотного описания в том, что оно позволяет человеку ориентироваться в незнакомой ситуации, не очень задумываясь о деталях окружающей сцены. Если неопытный путешественник начинает запоминать слишком много деталей, он их легко забудет. Обычному человеку достаточно помнить четыре-семь объектов в сложной динамической сцене для последующей рекогносцировки.

Обычно считают, что в мозг поступает как неосознаваемая вся информация, а затем избирательное внимание пропускает то, что потом становится осознанным. Уже давно нами была предложена гипотеза о парал-

лельном поступлении по разным каналам в мозг осознаваемой и неосознаваемой информации [Шелепин, 1996]. Согласно нашей общей концепции, работа механизмов получения осознанной и неосознанной информации и реакции на осознанные и неосознанные стимулы обусловлены работой каналов зрительной системы в различном пространственно-частотном и временно-частотном диапазонах. На основе этой концепции совместно с доктором медицинских наук И. С. Рудым (ВМА, Госпиталь МЧС) была разработана методологическая основа наркопсихотерапии [Шелепин и др., 1997]. В основе — методы управления поведением за счет блокировки тех или иных каналов зрительной системы, [Глезер, 1966; Campbell, Robson, 1968; Campbell, Kulikowski, 1969, 1972; Куликовский, Робсон, 1999].

Миограмму можно заменить чувствительной камерой в инфракрасном спектре как ближнем, так и относительно дальнем инфракрасном диапазоне. Ближний инфракрасный диапазон 700–1400 нм (0,7–1,4 мкм) воспринимают большинство приборов матрицы видеокамер и приборы ночного видения. В диапазоне 8–15 мкм чувствительны тепловизоры и приборы ночного ви́дения (рис. 9.8).

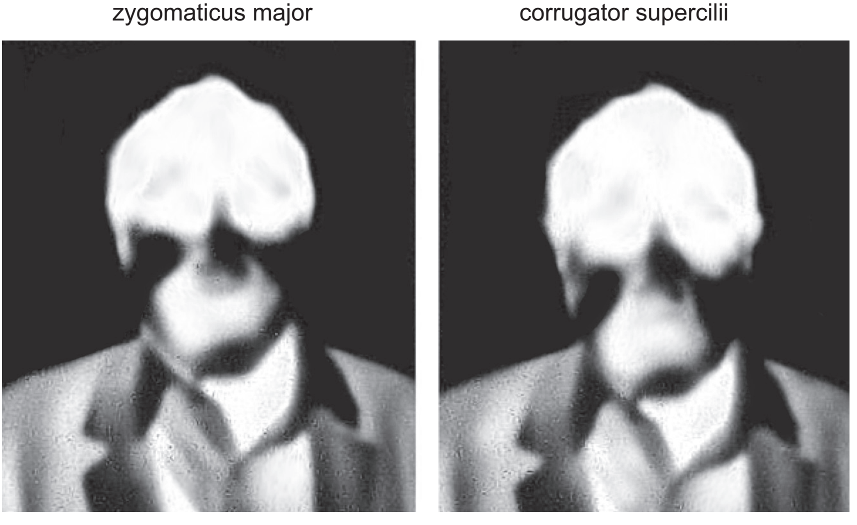


Рис. 9.8. Пример регистрируемых изменений мимики в инфракрасном диапазоне 8–14 мкм. Слева — выраженное напряжение мышцы улыбки (*zygomaticus major*), справа — выраженное напряжение мышцы хмурости (*corrugator supercilii*)

Представленные в ИК-диапазоне изменения видны и при обработке фотографии в видимом свете; однако невидимые стороннему наблюдате-

лю изменения мышц проявляются в оптической плотности изображения. Технологии работы с такими изображениями для решения клинических задач в гастроэнтерологии и кардиологии имеют давние традиции в Государственном оптическом институте [Мирошников 1987; Мирошников и др., 1977]. Нами доведена до практического применения обработка ИК-изображений при работе с невидимыми в видимом свете и неосознаваемыми испытуемыми напряжениями мимических мышц.

Применение нами тепловизионной техники позволило решить ряд практических задач по распознаванию мимики бесконтактным способом в ИК-диапазоне. Дело в том, что прекрасные электрофизиологические методы снятия электромиограм мимических мышц надежны, точны, но крайне неудобны в практическом применении. Гораздо удобнее дистанционные измерения. Они могут быть проведены с помощью совершенно доступной в наше время техники (еще несколько лет назад это требовало дорогостоящей аппаратуры и специальных методов обработки); более того, современная техника более устойчива к видимому освещению, чем это было совсем недавно.

Появление скрытых эмоций, измеряемых по увеличению тонуса соответствующих мышц, не всегда отражает внутреннее эмоциональное состояние человека. При просмотре тестовых фотографий улыбающихся или хмурящихся людей испытуемый непроизвольно и неосознанно за счет системы зеркальных нейронов как бы отвечает изображенным на тестовых фотографиях людям. Этот побочный результат работы так называемых зеркальных нейронов — важнейшего звена механизма невербальных коммуникаций, — тем не менее, обеспечивает адекватное социальное поведение. Кроме того, увеличение активности лицевых мышц улыбки в то время, когда человеку грустно, тоскливо, тревожно, может сдвигать эмоциональное состояние человека. «Искусственная» улыбка способна усиливать положительные эмоции. Важно подчеркнуть еще раз, что оппонентные взаимодействия на уровне мимических мышц — это не только подъем или опускание век (как на конечностях, когда работают сгибатели и разгибатели); в мимике возникает новый тип оппонентности — семантически оппонентные мышцы улыбки и хмурости работают взаимосвязано, но в разных частях лица. Они растягивают или стягивают лицо в разных его отделах при оппонентных эмоциях улыбки и хмурости. Когда сжимается мышца хмурости, расслабляется мышца улыбки. При синхронном возникновении одинакового напряжения этих мышц происходит нарушение семантики выражения лица, и наблюдатель приходит в замешательство, так как не знает, собеседник радуется или хмурится. Для самого исполнителя эта гримаса — результат смешанных чувств. В этой ситуации диссонанса оппонентных взаимоотношений можно применить термин Ф. Горбова — возникновение пароксизма деятельности.

9.3. НЕЙРОИКОНИКА И МИМИКА

Как уже говорилось нами ранее, лицо человека всегда было предметом изучения: вначале неосознанного, затем осознанного и позднее научного. Мимические деформации лица могут быть изучены не только с точки зрения средства невербальной коммуникации, но и как инструмент исследования неосознанных ранее и неосознаваемых в момент исследования реакций наблюдателя на внешние зрительные сигналы. Несмотря на то что это одно из интенсивно развиваемых направлений в психофизиологии, исследований в этой области гораздо меньше, чем в области слуха и речи. Сопоставление деятельности слуховых и речевых механизмов со зрительными механизмами приводит к парадоксу. С одной стороны, всем очевидно, что «слуховой мозг» человека состоит из приемника звука — слухового анализатора и системы воспроизведения биологически значимых звуков — средств вербальной коммуникации. С другой стороны, кажется загадочным и совсем не очевидным, что «зрительный мозг» человека также состоит из системы восприятия изображений и выделения в них биологически значимой информации (по аналогии с приемником звука) и системы воспроизведения, так называемого синтеза изображений — средств невербальной коммуникации, к которым относятся мимика, жесты, телодвижения и т. д. Под синтезом изображений понимаются напряжение определенных мышц и объединение данных напряжений в целостное изображение оптической системой наблюдателя. В данной главе акцент сделан на лице как главном средстве невербальной коммуникации, соответственно подробно рассмотрен и конечный продукт напряжения мышц — формирование специфического мимического паттерна в глазах собеседника или фотокамеры.

Связь между напряжением мышц лица и его выражением (деформациями) интересовала исследователей давно. Общие представления о взаимосвязи врожденного строения лица, определенном характере работы мышц и темпераменте формировались по меньшей мере со времен Гиппократа. Развивалась отдельная наука — физиогномика. Однако ее успехи и еще в большей степени драматические ошибки были обусловлены попытками опередить время и оценить проявление черт врожденного характера человека по конструкции и выражению лица. В меньшей мере были сделаны шаги в сторону оценки влияния сиюминутных эмоций на мимику и жесты как средств коммуникации между людьми. Развитие новых технологий в последние годы привело к тому, что к данному направлению проявляется беспрецедентно широкий интерес. В. А. Барабанщиков предложил дать этому разделу физиогномики отдельное название — фациопсихология [Барабанщиков, 2012]. Напомним, что по латыни facial — лицо, facialis — лицевой, facio — делать, faciom — Я.

Во время общения с собеседником, при восприятии изображений, при размышлениях происходят различные деформации лица — это результат постоянных, выраженных и незаметных мышечных сокращений. В большинстве эти микросокращения незаметны, они запускаются подсознательно, но их можно зарегистрировать [Tamietto, de Gelder, 2010]. С точки зрения физиологической оптики мельчайшие изменения — это предельные по отношению к разрешающей способности наблюдателя свойства сигнала, которые характеризуют его остроту зрения.

Близость этих изменений к пределу порождает неопределенность восприятия изображения. Эти условия наблюдения приводят к неопределенности принятия решения: есть на лице улыбка или ее нет. Приводят они к загадке. Эту загадку в невыраженной ясно улыбке люди чувствовали давно. Самый известный поиск проделал Леонардо да Винчи. Он подбирал степень выраженности улыбки Джоконды. Портрет является ярким примером мимических деформаций на пороге восприятия.

Следует отметить, что изучение свойств неопределенности при принятии решения имеет не только теоретический, но и прикладной аспект. Решение этой задачи актуально для развития современных систем искусственного интеллекта, в частности сверточных нейронных сетей, обучаемых распознаванию лиц. Последние достижения в данной области показали возможность обучения искусственных нейронных сетей распознаванию мимики с точностью до 98 % [Малахова и др., 2017]. Результаты машинного распознавания продемонстрировали, что вероятность наличия улыбки на лице Джоконды составляет 69,23 %. Это немного превышает уровень случайного гадания в сторону положительного ответа и соответствует особенностям восприятия мимики Джоконды человеком.

Чтобы разобраться в нейрофизиологии восприятия лица, необходимо рассмотреть особенности распознавания лица на «первичных» и «когнитивных» звеньях зрительной системы, оценить локализацию основных областей головного мозга, отвечающих за восприятие мимики, и описать основные временные характеристики процесса распознавания. Важно подчеркнуть, что не существует четкого деления на первичные и высшие каскады обработки информации в зрительной системе, это разделение условно, так как принятие решения о лице может приниматься на разных уровнях зрительной системы.

Рассмотрим роль низшего каскада обработки информации в задачах распознавания лиц. Данный каскад начинается с формирования изображения на сетчатке наблюдателя. Достаточно полно эти характеристики оптики глаза дает функция рассеяния оптики глаза и ее соотношения с упаковкой фоторецепторов в центральной части сетчатки, в фовеа (что подробно рассмотрено в соответствующих главах). Мы уже говорили, что

эти соотношения определяют пространственные характеристики рецептивных полей сетчатки и разрешающую способность глаза. Термин «разрешение», если применяется к изображениям в цифровой форме, обозначает величину, определяющую количество точек (элементов растрового изображения) на единицу площади (или единицу длины). Более высокое разрешение (больше элементов) обеспечивает более точное представление изображения. Другая интерпретация этого термина подразумевает угловые значения формирования изображения оптической системой на матрице фотокамеры или на матрице рецепторов в сетчатке глаза. Эта величина важна для понимания того, сколько необходимо пикселей для представления, передачи и восприятия определенного объекта (автомобиля или лица). Минимальный размер матрицы, требуемый для распознавания обычных технических средств (автомобили, самолеты), известен давно как критерий Джонсона [Johnson, 1958]. В своих работах он определил минимально необходимые значения разрешения и составил расширенный перечень уровней различения от обнаружения до определения намерения. Общие теоретические подходы также известны достаточно давно [Харкевич, 1972; Zvorykin, 1946]. Так, для уровня различения простых объектов «свой — чужой» требовалась матрица в 8 × 8, это размер шахматной доски, немного более сложных — 10 × 10. В целом следует отметить, что величина данной матрицы позволяет представить и лицо человека, но только в виде абстрактного «смайлика»; увидеть минимальные изменения в мимике невозможно. Для распознавания мимики нужна большая матрица 20 × 20. Но в зрении нет квадратных матриц, все «пиксели» имеют гексагональную упаковку. Для передачи основных эмоций необходима матрица из почти гексагональных (круглых, слегка сжатых) пикселей с радиусом около 12 этих пикселей. Площадь матрицы составит 452 пикселя. Работают пиксели на пределе разрешения в бинарном режиме. В гл. 1–5 и 6 было рассказано, какова полоса пространственных частот, и мы знаем, что самая высокая пространственная частота передается практически бинарно, белое и черное на среднем сером фоне, устанавливаемом адаптацией. Пиксель задается эффективной частью функции рассеяния. Он больше отдельного рецептора. Это означает, что светящаяся точка на сетчатке образует круг светорассеяния.

Данные о величинах функции рассеяния и диаметров фоторецепторов в фовеоле позволили рассчитать область, засвечиваемую светящейся точкой на сетчатке. Наблюдаемая «бесконечно» малая светящаяся точка (звезда, например) активизирует одновременно группу из семи рецепторов. Один из них расположен в центре, а шесть — в вершинах правильного шестиугольника [Campbell, Shelepin, 1989, 1992; Shelepin, 1989; Кемпбелл, Шелепин, 1990; Шелепин, Бондарко, 2002]. Таким образом, диаметр эффектив-

ной части функции рассеяния, равный 1 угл. мин., перекрывает 2–3 колбочки, если диаметр каждой из них равен 0,4 угл. мин., что соответствует средним значениям. Это означает, что на уровне рецепторов в силу оптических законов формируется «функциональный» элемент дискретизации. Представить себе изображение можно как двумерный массив со значениями, равными усредненной яркости по группе из семи рецепторов. Надо отметить, что «функциональный» элемент дискретизации не исключает роль фоторецепторов как основных анатомических элементов дискретизации, необходимых для передачи оптического изображения, сформированного на сетчатке, в нейронные сети зрительной системы. Функциональные пространственные элементы — это не связанные жестко между собой группы рецепторов, а мобильные их объединения, формирующие сигнал на последующие уровни зрительной системы под воздействием самого изображения. Как свет отбирает в процессе эволюции молекулы и структуры, так и изображения требуют для обработки и понимания их смысла соответствующих воспринимающих структур. Самое сложное изображение — это лицо, детали мимики, для их понимания и возникли самые сложные биологические системы восприятия.

Для проверки этой гипотезы были проведены работы, направленные на измерение минимального количества пикселей, необходимых для узнавания объектов различной степени сложности, и главное — лица человека, распознавания значения мимики [Кемпбелл, Шелепин, 1990; Шелепин, Бондарко, 2002]. Изображения разной сложности воспринимаются при различных угловых размерах. Иными словами, чем сложнее изображение, тем больше минимальных пикселей необходимо для узнавания этого объекта.

В соответствии с представленными в гл. 2 данными различение одной от двух точек происходит при размерах, несколько больших 1 угл. мин., а для распознавания лица и мимических деформаций необходима матрица с радиусом шесть элементов дискретизации. Если лицо представлено на матрице с радиусом меньше пяти элементов дискретизации, то распознать лицо невозможно. Проведены интересные исследования распознавания двух лиц с минимальными изменениями в чертах лица. Так, одно изображение отличалось от другого несколькими функциональными пикселами (рис. 9.9). Результаты показали, что эти отличия большинство наблюдателей способно уловить. Более того, в данных условиях возможно не только обнаружение лица, но и его идентификация [Campbell, Shelepin, 1989, 1992; Кемпбелл, Шелепин, 1990].

Рассчитаем размер реального лица, различимого подобной матрицей. Допустим, что межзрачковое расстояние у Мэрилин Монро равнялось 65 мм, следовательно, ее можно узнать на расстоянии 35 м. Подобная удаленность является типичной для распознавания лиц. На этом расстоянии

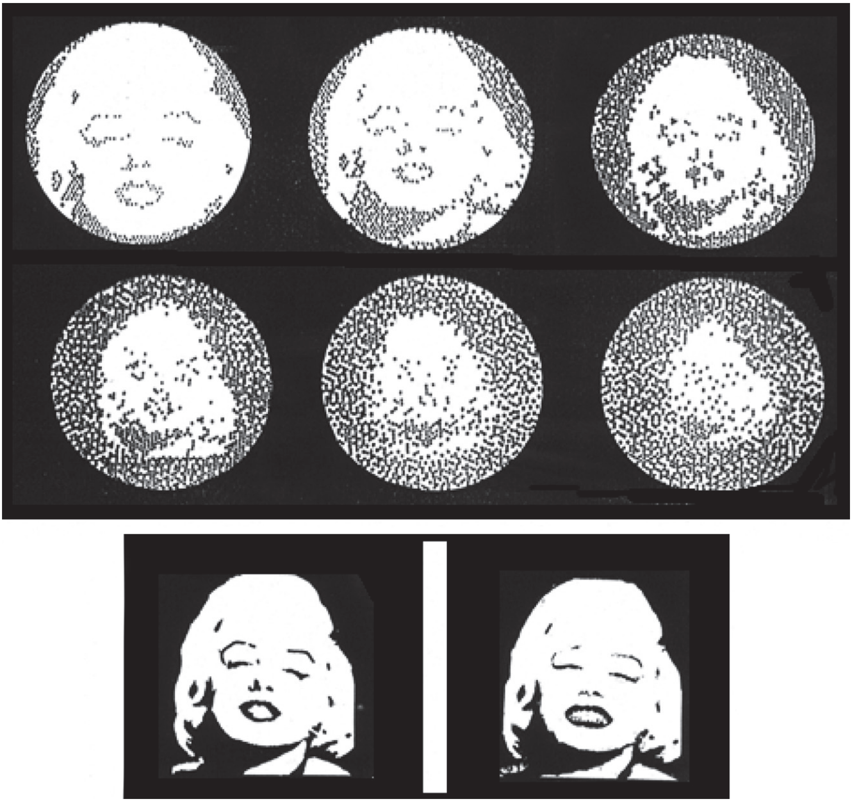


Рис. 9.9. Изображения Мэрилин Монро и другой актрисы. Отличие бинарных портретов всего в несколько функциональных пикселей делают их лица различимыми [Campbell, Shelepin, 1989, Кемпбелл, Шелепин 1990]. Вверху — две строки изображения лица Мэрилин Монро даны при разном уровне дискретизации, соответствующем различным угловым размерам. Каждая точка соответствует «функциональному» пикселю зрительной системы, определяемому функцией рассеяния точки оптикой глаза. Внизу — портреты Монро и другой актрисы при максимальном числе пикселей на изображение

межзрачковое расстояние составит всего 6,5 угл. мин. и будет представлено матрицей с радиусом в два гексагональных элемента дискретизации, а все лицо будет представлено матрицей с радиусом в восемь гексагональных элементов дискретизации. Если бы матрица, дискретизирующая объект, была вдвое больше, то максимальное расстояние, с которого лицо было бы узнано, сократилось бы вдвое и составило 17 м. Это привело бы к различным не-

приятным последствиям для человека на различных этапах эволюционного и исторического развития. Оптимальное согласование размеров матрицы гексагональных элементов дискретизации, самих элементов с оптическими свойствами света позволяет человеку на максимальном, физически возможном расстоянии отличить врага от друга (friend from foe).

Сопоставление частотно-контрастных характеристик зрения и пространственно-частотного спектра наблюдаемых изображений позволяет предсказать видимость объектов [Шелепин и др., 1985]. Блок-схема этого процесса представлена на рис. 9.10. Важная особенность данной блок-схемы в том, что, с одной стороны, она результат обработки изображения на ЭВМ, а с другой — эта схема привязана к определенным структурам мозга. На схеме существенными являются демонстрация структурных элементов мозга и соответствующий алгоритм модели, обеспечивающий сравнение на разных уровнях высокочастотной и низкочастотной пространственной информации.

Для описания лица вначале необходимы функциональные элементы обработки изображений (пиксели) — рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки — обычно имеют почти круглую форму, и их весовая функция представляет собой разницу двух гауссиан. Так, рецептивные поля нейронов первичной зрительной коры вытянуты, ориентационно избирательны [Hubel, Wiesel, 1968] и могут быть приблизительно описаны элементами Габора [Филд, 1999]. Как уже было сказано в начальных главах, они выделяют ориентационные составляющие в пространственно-частотном спектре. Если на изображении лица изобразить либо только низкочастотные, либо только высокочастотные рецептивные поля, то будет получено два разных типа изображений (рис. 9.11). Этот прием позволяет нам измерить минимальное число необходимых рецептивных полей для узнавания изображений. Это нужно для знания граничных условий распознавания лиц при решении технологических задач и в клинической диагностике. Вблизи для наблюдателя низкочастотное изображение размером 65 × 65 мм кажется сильно искаженным, и лицо на нем практически неузнаваемо. На изображении, содержащем высокочастотные составляющие, лицо того же размера вполне узнаваемо, несмотря на ореол, вызванный удалением низких частот. Если отодвинуться на достаточные для каждого изображения расстояния, то оба лица воспринимаются комфортно и хорошо узнаются. Эти два типа фильтрации можно сопоставить с разными техниками в живописи. Низкочастотная фильтрация дает изображения, которые напоминают размытые картины, присущие технике импрессионизма, а высокочастотная напоминает графику [Шелепин и др., 1985]. По изображению, содержащему высокочастотные составляющие, мы можем осознанно оценить эмоциональное состояние человека по мелким деталям лица. Низко-

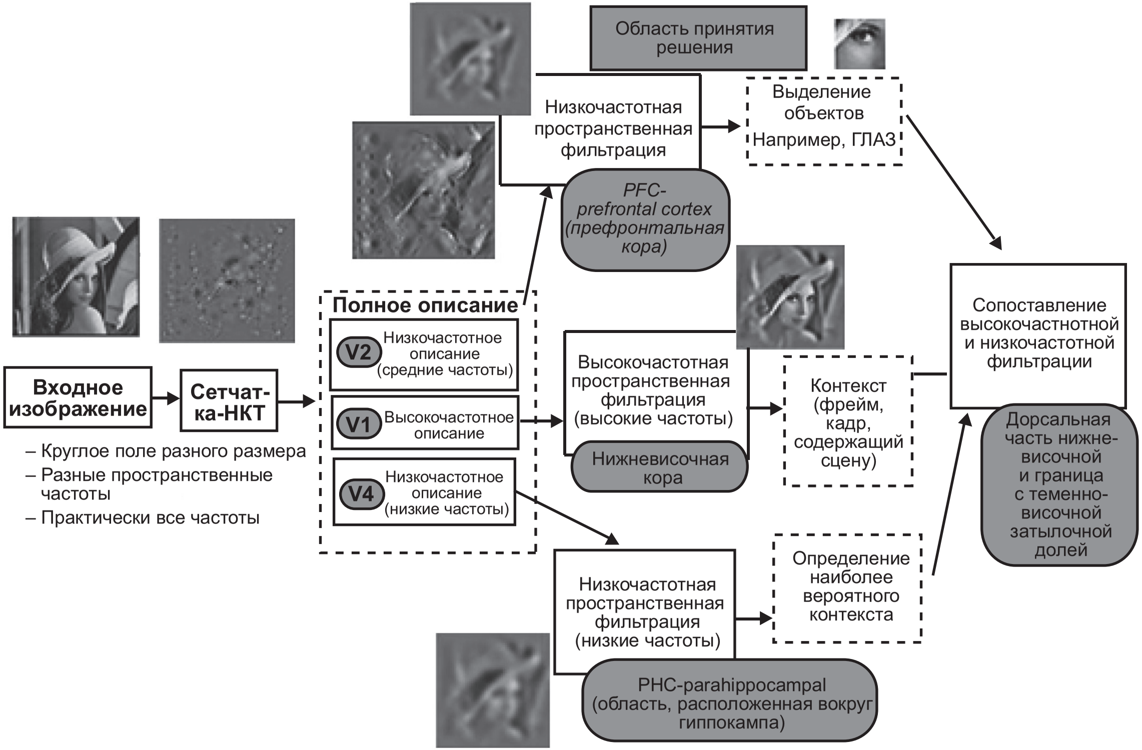


Рис. 9.10. Блок-схема передачи пространственно-низкочастотной и пространственно-высокочастотной информации по разным каналам зрительной системы

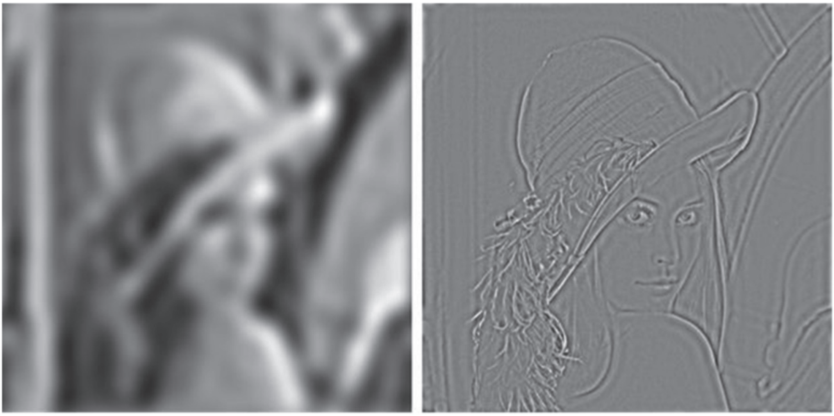


Рис. 9.11. Пример низкочастотного и высокочастотного описаний изображений в разных каналах зрительной системы

частотное описание оказывает более выраженное эмоциональное воздействие на наблюдателя, и зачастую это воздействие даже не осознается. Это неосознанное воздействие особо выражено при малых контрастах, изменении изображения во времени, больших угловых размерах изображения, активирующих самые низкочастотные каналы.

Важно отметить, что каждый компонент спектра изображения кроме амплитуды и фазы характеризуется также и ориентацией [Campbell et al., 1968; Цуккерман, 1978; Филд, 1999]. Между нейронами и нейронными сетями, выделяющими разные ориентации, установлены оппонентные взаимоотношения [Шелепин, 1981 а]. В первичной зрительной коре (BA17) имеются системы нейронов, выделяющие преимущественно средне- и высокочастотные полосы пространственных частот [Campbell, 1974; Глезер и др., 1975], и главное — их ориентационную составляющую [Hubel, Wiesel, 1968]. При решении задачи узнавания лица на простом фоне зрительная система использует горизонтальные составляющие пространственно-частотного спектра изображения, которые в воспринимаемом образе формируют брови, глаза и губы. Эти визуальные ключи могут быть упрощены до чередующихся темных и светлых полосок различной ширины, получивших название штрихкода лица [Мурыгин, 2003; Dakin, Watt, 2009]. При этом, несмотря на различные манипуляции со стимулами (изменение размера, освещения, ракурса), штрихкод остается неизменным для конкретного лица и позволяет узнать воспринимаемый образ (рис. 9.12).

Горизонтальные составляющие хорошо выделяют не только лицо, но и объекты других семантических категорий, находящихся на заднем плане. Однако во многих случаях горизонтальных составляющих оказывается

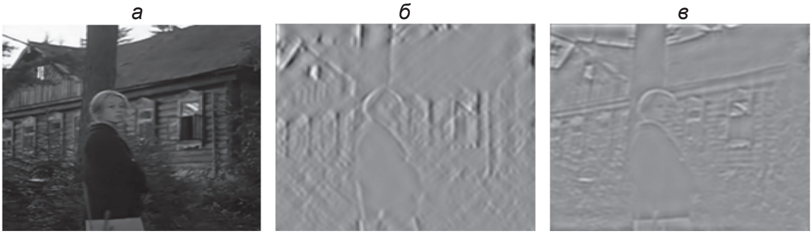


Рис. 9.12. Исходный кадр фильма (а) и примеры вертикальной (б) и горизонтальной (в) вейвлетной фильтрации [Логунова и др., 2014]

недостаточно. Оптимальной для выделения фигуры человека оказывается вертикальная фильтрация: она наиболее эффективно определяет размер и положение вертикального объекта, что является первоочередной задачей обнаружения человека в восприятии сложных сцен.

Именно вертикальные составляющие определяют очертания всей фигуры человека. «Зрительный мозг», используя вертикальные составляющие, строит шаблон, который позволяет соотнести движущийся объект с категорией «человек», после чего с помощью горизонтальных составляющих строится штрихкод лица, с помощью которого и происходит идентификация человека.

Когда объектом анализа в зрительной системе наблюдателя является лицо человека, для выявления паттернов невербальной коммуникации, проявляющихся в минимальных изменениях мимики, уже недостаточно информации, содержащейся в горизонтальных и вертикальных пространственно-частотных составляющих изображений. Мы предположили, что она содержится в диагональных составляющих. Незначительные изменения в деталях, такие как усиление за счет диагональной фильтрации мелких морщин в уголках рта и глаз, могут существенно изменить восприятие эмоциональных аспектов лиц, запечатленных на изображениях. Подготовка изображения для выделения незначительной, практически скрытой информации происходит неосознанно в рецептивных полях затылочной коры в результате процессов, напоминающих пространственно-частотную фильтрацию с использованием вейвлетов, подобных элементам Габора. Эту фильтрацию можно рассматривать как особую маску, «грим», подчеркивающий мимические особенности при восприятии лиц, которые являются опорными сигналами для механизмов принятия решения на более высоких уровнях зрительной системы (рис. 9.13).

Роль диагональных составляющих также можно продемонстрировать, если обратиться к исходной фотографии в знаменитой «Иллюзии Маргарет Тэтчер» Питера Томсона [Thompson, 1980]. Иллюзия состоит в том, что даже если значительно исказить лицо человека и предъявлять его вверх

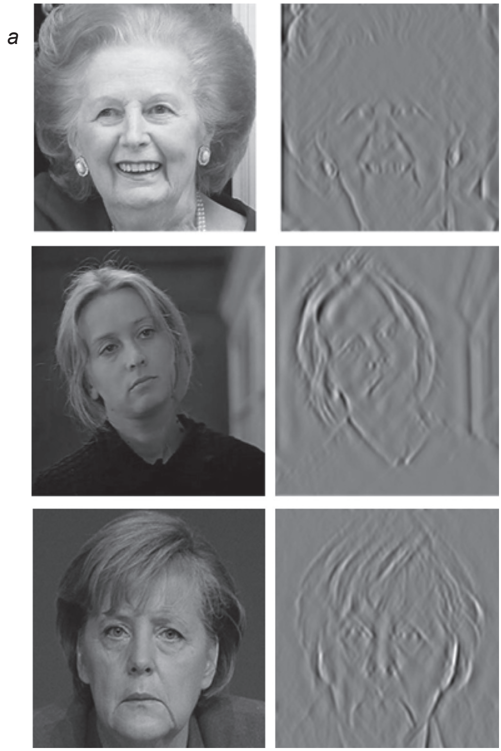


Рис. 9.13. Примеры диагональной фильтрации:
а — исходные изображения;
б — после вейвлетной фильтрации. Видно напряжение мышц *zygomaticus*, обеспечивающих улыбку, и *corrugator*, создающих хмурость [Логунова и др., 2014]

подбородком, то наблюдатель не может его отличить от исходного изображения. Если изображения Маргарет Тэтчер (исходные и деформированные) имели нормальную ориентацию, то наблюдатель легко различал исходное и искаженное изображения. При этом он узнавал, чей это портрет, даже если он был искажен. Искажения были значительными: Питер Томсон вырезал из лица два прямоугольника, один содержал оба глаза, авторой — губы, развернул их на 180 угл. град. и прикрепил их в том же месте. Интересно, что наблюдатели не просто узнавали, но и понимали, что это гротеск. Следует заметить, что многократные попытки получить таким способом ярко выраженный гротеск на других лицах удавались не всегда. Это означает, по-видимому, что определенные черты лица придают сильную эмоциональную окраску изображению. Мы отфильтровали исходный неискаженный портрет Маргарет Тэтчер с выделением диагональных пространственно-частотных составляющих и получили выраженный гротеск, практически идентичный эффекту, который получил Томсон с разворотом положения губ. Таким образом, цифровая фильтра-

ция с выделением диагональных составляющих, по-видимому, позволяет объяснить эффект гротеска, дополнительный к эффекту «слепоты к искажениям лица» в положении поворота «вниз головой» в иллюзии, открытой Питером Томсоном [Thompson, 1980; Martinez-Conde, 2013].

Диагональную фильтрацию мы применили при исследовании изменения мимики лица военнослужащих НАТО, участников афганской кампании. Известный голландский фотограф Клэр Фелиции создала и опубликовала огромный архив пятисот лиц до, во время и после афганской кампании [Felicii, 2010]. Просмотр фотографий лиц молодых людей в этот ответственный период их жизни позволяет заметить мимические изменения. Мы сочли, что это бесценный капитал для обработки с помощью методов нейроиконики. С разрешения Клэр Фелиции, мы приводим результаты этой работы на рис. 9.14.

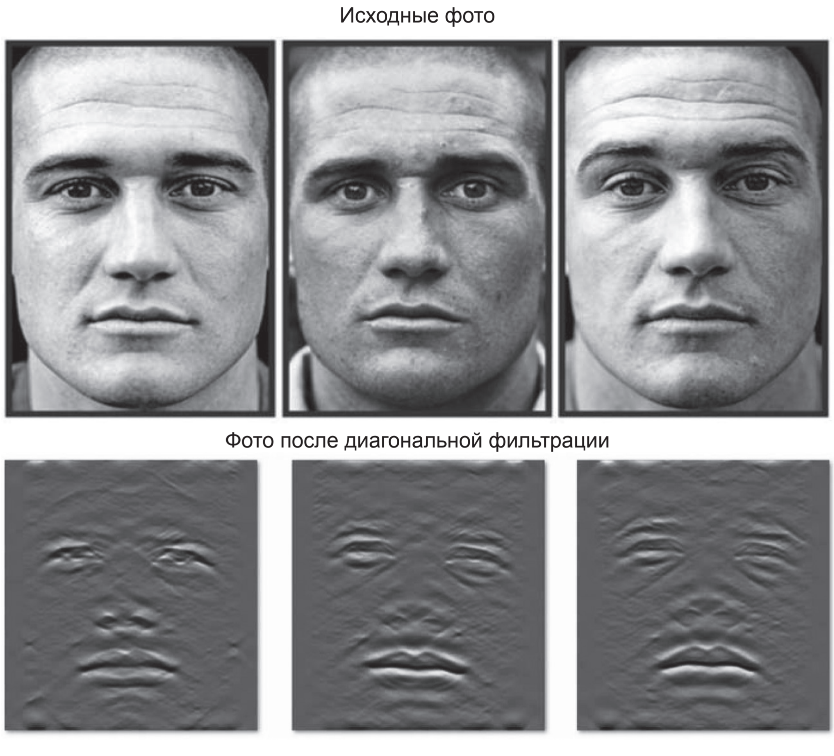


Рис. 9.14. До, во время и после афганской кампании. Исходные фотоизображения представлены вверху [Claire Felicie, 2013], изображения после обработки диагональной фильтрацией показаны внизу [Логунова и др., 2015]

Каждому из этих трех черно-белых фотоизображений соответствует год жизни. Второй год — война. Методы диагональной фильтрации позволили усилить главное в этих изображениях лиц — их эмоциональную составляющую. На первом (левом) снимке молодого человека до участия в боевых действиях видно отсутствие напряжения мышц zygomaticus (улыбка); на снимке во время пребывания в боевой обстановке видно напряжение мышцы corrugator (хмурость) и frontalis (удивление жизни — видно, как поднялись брови) — после возвращения домой после службы.

Диагональная фильтрация позволяет, как театральный грим, усилить значимые морщины или их подавить.

ГЛАВА 10

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ МИМИКОЙ

10.1. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИЦ

Рассмотрим нейрофизиологические механизмы высших каскадов обработки информации, на которых осуществляются сравнение изображений с «динамическими шаблонами» и принятие решений. За последнее время накопилось значительное количество экспериментальных данных по основным структурам мозга, которые традиционно связываются с распознаванием лиц.

В середине 1960-х годов была разработана концепция о гностических нейронах, локализованных в нижневисочной коре и избирательно реагирующих на целостные объекты [Konorski, 1967; Gross, 1972, 1973, 1992]. В начале 1980-х годов были зарегистрированы отклики группы клеток на изображения лиц в области дна верхней височной борозды мозга обезьян. Было показано, что на целые лица и переменчивые аспекты мимики эти группы клеток отвечали активнее в сравнении с другими типами изображений. Данные ответы изменялись и в случае наличия помех, которые сильно ухудшали возможность восприятия лиц [Perret et al., 1982, 1985; Rolls, 1986].

Далее экспериментально было показано, что активность нейронов в данной области определяется не только наличием в поле зрения изобра-

жения лица, но и весьма чувствительна к лицевой мимике. Было высказано предположение, что эти нейроны оценивают направление взгляда, положение уголков губ, глаз, бровей, степень их изгиба, взаимного расположения частей лица, что важно для опознания мимики [Haxby et al., 2000; 2011]. В области нижневисочной коры были также зарегистрированы специфичные реакции на изображения лиц, отличавшиеся по своей топографии от реакций на изображения домов, мебели или букв [Tanaka et al., 1991; 1996; 1997; 1998].

На основании полученных данных была построена схема строения нижневисочной коры, состоящая из сверхколонок нейронов, которые реагируют на разные вариации в изображении одного объекта; исследован механизм адаптации нейронов к изображению лица в нижневисочной коре [Tanaka et al., 1991; 1993; 2003; Tsunoda, 2001]. Показано, что адаптация к семантике изображения происходит аналогично тому, как и на предыдущих уровнях зрительной системы происходит адаптация к физическим признакам изображения (таким, как яркость, цвет, ориентация, контраст, пространственная частота).

В дальнейшем к основным зонам мозга, отвечающим за распознавание лиц, была причислена так называемая затылочная область лица (occipital face area) в нижней затылочной извилине. В ней найдены статистически значимые отличия ответов нейронов при восприятии изображений лиц в сравнении с другими объектами [Haxby et al., 2000; 2011; Ishai, 2008].

Необходимо отметить, что сведения о характере активационных сдвигов в других областях мозга человека при распознавании лиц весьма разнообразны, что связано со спецификой экспериментальных условий. Так, в исследованиях часто упоминаются следующие структуры: миндалина и островковая кора, которые участвуют в обработке эмоциональной выразительности лица [Fusar-Poli et al., 2009]; нижняя лобная извилина, участвующая в обработке семантической информации [Ishai et al., 2002]; орбитофронтальная кора и вентральная часть стриатума, которые обеспечивают описание привлекательности лица [O'Doherty et al., 2003].

10.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РАСПОЗНАВАНИИ ЛИЦ

В лаборатории физиологии зрения Института физиологии имени И. П. Павлова РАН и в отделе лучевой диагностики кафедры лучевой диагностики Национального медицинского исследовательского центра име-

ни В. А. Алмазова проводятся исследования отклика мозговых структур по изменению BOLD-сигнала с помощью фМРТ на изменения мимики. О. В. Жуковой, П. П. Васильевым, Ф. В. Соколовым, В. А. Фокиным, Г. Е. Труфановым и Е. Ю. Шелепиным проведены исследования деятельности нейронных сетей в процессе восприятия лиц. Рассмотрим карты активации, полученные в этих исследованиях, выполненных методом функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), который позволяет определить активность нейронов по изменению кровообращения в мозгу. Основная задача МРТ — получение контрастного изображения, в котором одно вещество можно отличить от другого; в случае фМРТ применяют особую методику нейровизуализации, использующую оксигемоглобин и дезоксигемоглобин в кровеносных сосудах как эндогенный контрастный агент — метод BOLD (blood oxygenation leveldependent contrast).

Методика BOLD основана на следующем принципе: повышение нейрональной активности вызывает местное увеличение потребления кислорода — это ведет к увеличению уровня парамагнетика дезоксигемоглобина, который снижает уровень сигнала фМРТ. Но через несколько секунд нейрональная активность вызывает также увеличение церебрального кровотока и объема крови, что ведет к увеличению притока артериальной крови и, следовательно, к увеличению оксигемоглобина. По неизвестным пока причинам количество оксигенированной крови, которая поступает в ответ на активность нейронов, сильно превышает метаболическое потребление кислорода. Эта своего рода сверхкомпенсация оксигемоглобина ведет к изменению в соотношении оксигемоглобина и дезоксигемоглобина, что измеряется и является основой для BOLD-фМРТ-сигнала [Ogawa et al., 1990; Friston, 1995, 1997].

Для целей данного исследования методами иконики с использованием непрерывного 3D-морфинга на базе программного обеспечения FaceGen (Singular Inversions, Canada) были применены специальные тестовые изображения лиц виртуальных людей с заданными характеристиками — оптоклоны [Шелепин и др., 2014]. 3D-морфинг — технологии компьютерной анимации, создающей впечатление плавной трансформации одного объекта в другой. Сам термин происходит от слова metamorphosing — проведение преобразования, в котором один образ постепенно преобразуется в другой. Необходимо отметить, что образы — 3D-модели головы — представлены с помощью полигональной сетки и натянутой текстуры. Размещая в программе два образа, например с минимальной и максимальной степенями выраженности эмоции, можно синтезировать их промежуточные варианты. Таким образом осуществляется непрерывной морфинг лица.

Напомним, что в качестве стимулов мы использовали синтезированные изображения лиц. Эти лица не имели пола и национальности. Интерес-

но, что в данных экспериментальных условиях большинство испытуемых воспринимали лица в большей степени как мужские, а не женские, что может быть связано с отсутствием волос. Синтезированные лица не могли быть знакомы испытуемым. Вероятно, в связи с тем, что синтезированный стимул не мог быть связан с наблюдателем какими-либо личными отношениями, лицо воспринималось не как целостный объект, а как сцена, состоящая из нескольких объектов отдельно — глаз, губ, носа. Поэтому задачу определения эмоций и поворота испытуемый решал, как пространственную задачу определения относительного положения уголка губ (вверх или вниз) и положения носа относительно центральной оси лица (поворот направо или налево).

Как и при стимуляции матрицами, выявлена активация в поясной коре при сравнении BOLD-сигналов покой — активация. Структуры, входящие в сеть базового режима, находятся в оппонентных отношениях со структурами, активирующимися при выполнении задач распознавания, поставленных в наших экспериментах. Возможно, нейронные структуры сети базового режима выполняют роль своеобразного сравнивающего устройства, компаратора активности медиальных зон коры с активностью латеральных областей префронтальной коры. Оценка испытуемым поворота уголков губ и поворот носа при оценке эмоционального выражения и при оценке поворота головы невозможна без участия механизмов, обеспечивающих избирательное внимание. Поэтому на полученных нами картах фМРТ-активности получена активация различных участков теменной коры.

Таким образом, анализ данных функционального картирования мозга человека показал, что, вероятно, существуют два основных функциональных блока, входящих в систему распознавания лиц: первый — фузиформная кора, которая активируется всегда при предъявлении лиц; второй — теменная, лобная и другие области, участвующие в распознавании лиц. Структура второго блока зависит от инструкции и других экспериментальных условий. Этот результат находит подтверждение и в результатах фМРТ-исследований, проведенных в других лабораториях [Haxby, 2011; Sarkheil et al., 2013].

Ранее было косвенно показано участие фронтальной коры в распознавании лиц методом вызванных потенциалов [Jeffreys, 1989; Измайлов и др., 2000; Михайлова, 2005; Mikhailova et al., 1997]. В префронтальной коре — в этой задаче — еще более наглядно была выявлена оппонентность работы нейронов поясной извилины и дорзальной префронтальной коры. Кроме взаимодействий внутри префронтальной и фронтальной коры есть прямое и обратное взаимодействие с областями теменной, нижневисочной и затылочной коры. Показана принципиальная разница пассивного и активного восприятия. Пассивная монотонная обработка зрительной ин-

формации мозгом включает преимущественно затылочные области мозга. Усложнение экспериментальной ситуации «подключает» зрительные зоны височной и теменной коры. Необходимость активного выбора, принятия решения планирования действий на основе полученной информации и принятого решения включает практически все области мозга, вплоть до фронтальной коры. Однако упрощение стимуляции или научение вновь перераспределяет активность.

Показаны наглядные различия активности между медиальной и латеральной поверхностью фронтальной коры. Эти различия позволили предположить существование нескольких центров принятия решений во фронтальной области. Между ними имеются оппонентные внутрикорковые связи. Имеются области, осуществляющие решения по множественным критериям и по конфликтующим оценкам. Например, решения в эмоциональной сфере могут конфликтовать с решениями в сфере познавательной. Центры принятия решений работают с применением множественных критериев как нейронные оппонентные системы. Такая конструкция фронтальной области обеспечивает адекватное поведение в повседневных и экстремальных ситуациях. Нарушение существующего баланса приводит к «пароксизмам» в деятельности человека.

В следующей серии исследований было синтезировано тридцать шесть разных лиц. Процедура стимуляции включала предъявление двух фаз стимуляции (рис. 10.1).

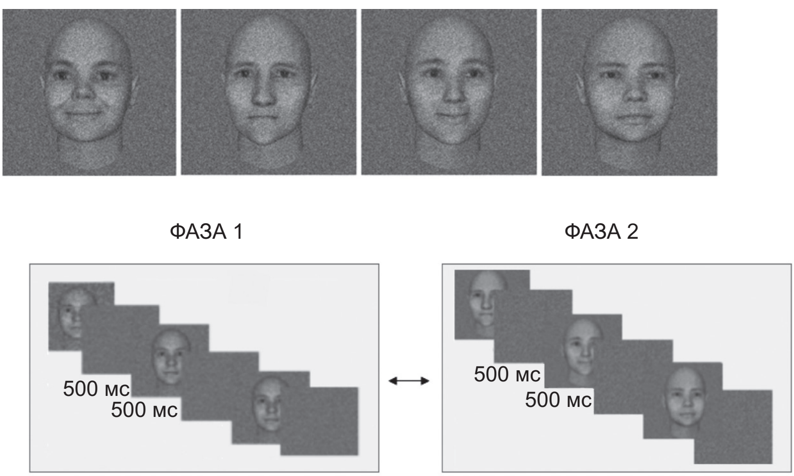


Рис. 10.1. Методика проведения фМРТ-исследования: примеры стимулов и описание фаз стимуляции

В фазе 1 многократно предъявляли изображения тридцати шести оптоклонов с нейтральным выражением лица, ориентированных прямо. В фазе 2 предъявляли изображения тех же оптоклонов, но изображения лиц давались в разных поворотах, при разных выражениях эмоций. Добровольцы выполняли две инструкции: в фазе 1 необходимо было нажимать клавишу в ответ на каждое предъявление стимулов, а в фазе 2 — распознавать либо мимику (радость-грусть) либо поворот лица (направо-налево). Выбор регистрировали по нажатию добровольцами левой или правой клавиши компьютерной мыши.

Рассмотрим карты активации, полученные путем вычитания результатов в различных фазах стимуляции. Выявлено, что активация в условиях использования инструкции на определение эмоции повышена в сравнении с инструкцией на определение поворота. При выполнении обеих инструкций мы наблюдаем специфический паттерн сети распознавания лиц: активация классических, ответственных за распознавание изображений лиц (например, фузиформная извилина, BA37), и дополнительных зон мозга, которые зависят от инструкции и других экспериментальных условий (см.: цветная иллюстрация 10.1).

Рассмотрим более подробно расширенную часть системы распознавания лиц, которая зависит от различных факторов. Так, согласно полученным данным, при выполнении обеих инструкций наблюдается обширная активация во фронтальном и теменном отделах головного мозга. Эти зоны активно участвуют на разных этапах невербальной коммуникации в описании пространственных отношений (элементов лица), отношении в положении в пространстве между людьми, в привлечении внимания и в принятии решений. Особо выделим активацию в области премоторной коры — вторичной двигательной зоны, в которой возникают и формируются план и последовательность сложных движений. Роль данной области в распознании лиц до конца не определена. Принято считать, что вентральные части премоторной коры функционально связаны с предметным вниманием, а дорсальные — с пространственным. Также наблюдается обширная активация в теменных отделах головного мозга, особенно она выражена в нижней и верхней частях теменной доли. Известно, что теменная кора играет ключевую роль в пространственном внимании, описании пространства, пространственных отношениях, отношениях между индивидуумами, индивидуумом и захвате рукой [Hyvarinen, Shelepin, 1979]. Активация данного паттерна в наших условиях, скорее всего, была вызвана спецификой стимульного материала (синтезированные лица).

Наблюдается невысокий уровень активации в островковой доле коры конечного мозга (insular cortex) и скорлупе (putamen). Островковая кора и скорлупа связаны с социальным взаимодействием, в частности невербаль-

ной коммуникацией, эмоциональным восприятием, особенно при работе с изображениями лиц, вызывающими негативные эмоциональные реакции, — это подтверждено в многочисленных исследованиях — кольцо ненависти и отвращения [Senju et al., 2009; Conty et al., 2007]. По вежливым отчетам наших испытуемых оптоклоны воспринимались как некрасивые. Активация в миндалине, которая является важнейшей структурой в системе распознавания лиц, в наших условиях не выявлена ни для одной из задач. Можно предположить, что, во-первых, это связано с тем, что стимулы в различных задачах были одни и те же, менялась только инструкция; во-вторых, лицо, даже нейтральное, является эмоциональным стимулом [Барабанщиков и др., 2014]. Таким образом, миндалина была активирована во всех фазах исследования. Согласно методике проведения фМРТ, карты активации рассчитываются на основе вычитания одной фазы из другой. Соответственно при вычитании фаз активация в данной области была усреднена.

В целом следует отметить, что полученные карты активации зон, входящих в расширенную часть нейронной сети, совпадают с данными, полученными в других лабораториях в различных задачах, связанных с принятием решения [Keuken et al., 2014]. Но в то же время необходимо подчеркнуть, что эти же зоны играют существенную роль и в процессах восприятия лица. Дело в том, что при восприятии значимых эмоциональных стимулов (лицо, движение) человек автоматически моделирует в своем сознании психическое состояние другого. Понимание того, что делают другие, как они себя чувствуют в определенной социальной ситуации, какие эмоции испытывают, — все это является необходимым условием для того, чтобы успешно ориентироваться в сложном и постоянно меняющемся мире.

Базисом проникновения во внутренний мир другого человека является процесс подражания — воспроизведение субъектом движений, действий, поведения, в том числе и эмоционального состояния другого субъекта. Нейрофизиологической основой подражания являются зеркальные нейроны; этот термин был определен в середине 1990-х годов для обозначения группы нейронов, найденных в коре больших полушарий макак методом введения микроэлектродов [Rizzolatti, et al., 2004]. Данные нейроны возбуждаются как при выполнении определенного действия, так и при наблюдении за выполнением этого действия другим индивидуумом [DiPellegrino et al., 1992; Gallese et al., 1996]. Первоначально они были обнаружены в нижней лобной извилине, затем в нижней теменной доле и верхней височной борозде. Впоследствии в данную сеть был включен регион премоторной коры [Gallese et al., 2004; Iacoboni, 2005; Rizzolatti et al., 2001; 2004; 2008].

Таким образом, активизация зеркальных нейронов происходит не за счет какого-либо одного нейрона, а как результат работы целой нейронной сети. Так, нейронная архитектура процесса подражания, согласно Марко Яко-

бони [Iacoboni, 2005], состоит из последовательных этапов: сигнал сначала поступает в верхнюю височную борозду, затем происходит его передача в задние теменные отделы, оттуда — в нижнюю лобную извилину (в данной области происходит кодирование цели действия, его оценка), далее сигнал возвращается в височную кору. Согласно полученным данным [Iacoboni, 2005; Rizzolatti, 2001], в этой области происходят сравнение действия другого индивидуума и сенсорные последствия акта подражания. Если при сравнении наблюдается совпадение данных, то имеет место акт подражания. Функционирование этой системы также зависит от инструкции и экспериментальных условий. Так, исследования, проводимые на приматах, показали, что разные нейроны активируются в случае, когда макака тянется к еде и подносит ее ко рту, а также когда она перемещает еду в сторону [Hyvarinen, Shelepin, 1979; Fogassi, 2005].

Здесь мы обращаем внимание на то, что системы зеркальных нейронов и описания лиц в первую очередь связаны с сенсорным невербальным взаимодействием и участвуют в построении мимики, поз и жестов в основном при взаимодействии субъектов. В наших исследованиях зоны активации при восприятии лиц и оценки их эмоций совпадают с зонами, в которых другими исследователями были найдены зеркальные нейроны. Большая активация в наших экспериментальных условиях наблюдается в области премоторной коры. Для данной области характерна двухсторонняя активация, что, согласно экспериментальным данным [Leslie et al., 2002], имеет отношение к имитации, а не к пассивному наблюдению за стимулами. Измерен усредненный уровень активации в активной фазе для группы из двадцати четырех человек при $p = 0{,}001$ (FDR-corrected, $p = 0{,}05$) в задаче на определение эмоции. Зафиксированы некоторые отличия в положении активированных зон левого и правого полушарий. Полученные в нашем исследовании отличия, вероятно, можно объяснить наличием речевых зон Брока и Вернике в левом полушарии.

При обратном вычитании (фаза 1 — фаза 2) наблюдается паттерн, совершенно отличный от паттерна предыдущей фазы мозговой активации (см.: цветная иллюстрация 10.2). Данный паттерн включает в себя медиальную префронтальную кору, височно-теменной стык, предклинье и заднюю поясную извилину [Van Overwalle, 2009; Amodio et al., 2006; Brass et al., 2007; De Lange et al., 2008]. В современных исследованиях данный паттерн определяют как сеть по умолчанию, или сеть базового режима. Активация при этом также значительно больше в задаче распознавания мимики лица.

Известно, что некоторые области мозга (поясная извилина, часть теменной коры) демонстрируют высокий уровень активности во время так называемого покоя (пассивная фаза) — периода отдыха испытуемых от активного решения экспериментальной задачи (активная фаза). Это наивное представление касается внешнего двигательного проявления актив-

ности. Происходит сравнение ситуаций, когда есть деятельность и ее нет. Отсюда возникло представление о зоне покоя. В действительности мозг постоянно работает, но происходит при смене деятельности активация разных областей, которые связаны в крупномасштабное нейронные сети. Поэтому мозг работает как компаратор, сравнивающее устройство, о чем мы неоднократно упоминали.

В наших экспериментальных условиях покоя не было, но инструкция, выполняемая в фазу 1, казалась испытуемым более простой задачей, так как в данной фазе требовалось просто нажимать на клавиши в ответ на предъявление тестового стимула в сравнении с фазой 2, когда требовалось проводить классификацию (распознавать мимику или поворот). Таким образом, мозг перестраивает паттерн своей активации при смене деятельности в зависимости от контекста. Можно предположить, что активация данного паттерна в наших экспериментальных условиях была вызвана более простой инструкцией фазы 1. Однако можно сделать и другое предположение. Мы отмечаем максимальную активацию при максимальной разнице вычитаемых фаз. Существует большое количество экспериментальных данных, подтверждающих активацию этих областей в задачах, связанных с эпизодической памятью [Greiccius et al., 2004], представлением себя, в условиях социального познания и взаимодействия [Canessa et al., 2012; Iacoboni et al., 2004]. Если режим таков, что активация сменяется ее отсутствием — отдыхом, то возникает предположение, что данная сеть связана не с состоянием покоя, а с внутренней деятельностью мозга человека. Эту деятельность образно называют внутренним мышлением субъекта [Andrews-Hanna et al., 2011]. Следует также отметить, что в фазе 1 мы предъявляли лица, которые были прямо ориентированы относительно сагиттальной оси (в фас). Взгляд глаза в глаза играет важную роль в социальном взаимодействии людей. Особое место в данном типе взаимодействия отводится работе мимических мышц лица, позволяющих передать как сильные, так и едва уловимые психологические состояния другого человека. Это предположение совпадает с уже известными данными, согласно которым направление взгляда прямо, глаза в глаза, может вызвать активацию данного паттерна [Conty et al., 2007]. Особый интерес при анализе паттернов активации представляет активация в области медиальной префронтальной коры. Роль медиальной префронтальной коры на данный момент активно обсуждается. Принято считать, что данная структура участвует в описании и оценке как своего, так и чужого психического состояния [Bryan et al., 2012]. Особенно интересны исследования, изучающие роль данной области в этиологии клинических расстройств. Так, при заболеваниях, сопровождающихся дефицитом способности понимать чужие убеждения, намерения и чувства (например, при аутизме, шизофрении, тревожных расстройствах и депрессии), присутствуют дисфункции в зоне медиальной префронтальной коры.

10.3. ОППОНЕНТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗВЕНЬЕВ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В РАСПОЗНАВАНИИ ЛИЦ

Особо следует подчеркнуть тот факт, что данные системы, выявленные нами при вычитаниях различных фаз стимуляции, функционируют не изолированно, а только во взаимодействии. Методом оценки локального кровотока во времени (*BOLD*-сигнала) мы провели анализ между вовлеченными в данную работу разными структурами мозга в различных фазах стимуляции. В каждой фазе зарегистрировали синхронное изменение активности функциональных зон (рис. 10.2 а). Показано, что уровень *BOLD*-сигнала в этих структурах сходным образом модулируется условиями стимуляции — чередованием фаз. Полученные результаты, несмотря на разнородную функциональную специфику указанных областей, позволили усреднить их и сравнить между собой. Таким образом, выявили оппонентный ход кривых (рис. 10.2 б). Подчеркнем, что этот принцип является крайне важным в механизме принятия решения в задачах распознавания лиц. Ранее было показано, что баланс при восприятии формы изображения осуществляется при помощи оппонентного механизма взаимодействия разных нейронных структур аналогично тем оппонентным механизмам, которые известны в первичных структурах зрительной коры [Шелепин 1981 а; 1981 б; Шелепин и др., 2011; Шелепин и др., 2014].

В данных исследованиях были рассмотрены медиальные и латеральные области фронтальной коры как элементы оппонентной системы, обеспечивающей принятие решений. В действительности это, возможно, слишком грубые представления и элементами могут быть куда более мелкие образования, в том числе каждая из классических цитоархитектонических зон фронтальной коры может включать разнородные функциональные структуры. Таким образом, центры принятия решений работают с применением множественных критериев как нейронные оппонентные системы. Данное предположение совпадает с уже известными данными, согласно которым оппонентность — главный принцип работы мозга. Это предположение было впервые выдвинуто Коки Кавамурой в 1972 году [Kawamura, 1972]. В своей работе на примере головного мозга кошки он в художественной манере показал данный принцип в действии (рис. 10.3).

Еще один важный аспект в изучении закономерностей перестройки нейронных сетей головного мозга — исследование эффекта привыкания к структуре изображения. Была проведена отдельная серия фМРТ-исследований, которая практически полностью повторяла схему эксперимента, описанно-

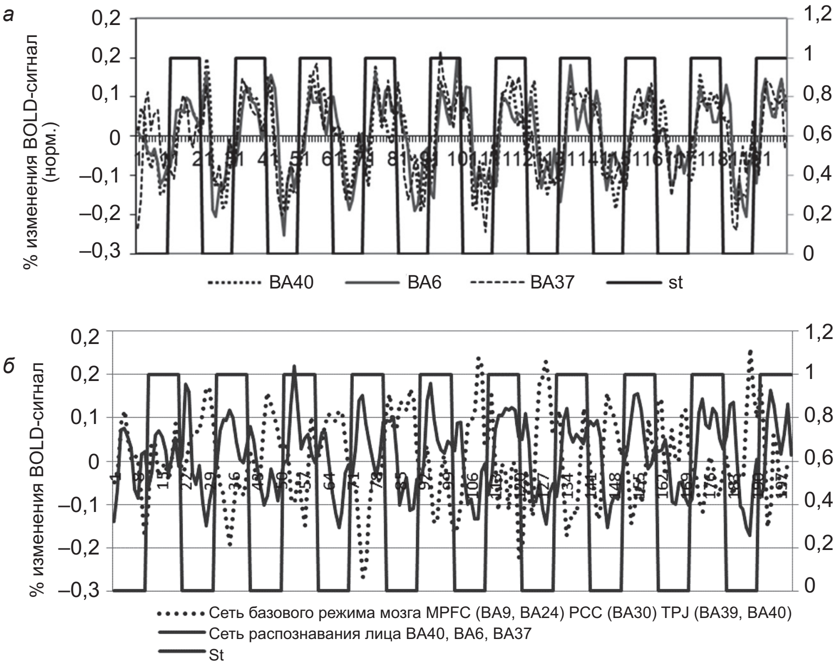


Рис. 10.2. Изменение во времени усредненного *BOLD*-сигнала в синхронно и оппонентно работающих зонах мозга в разных фазах стимуляции

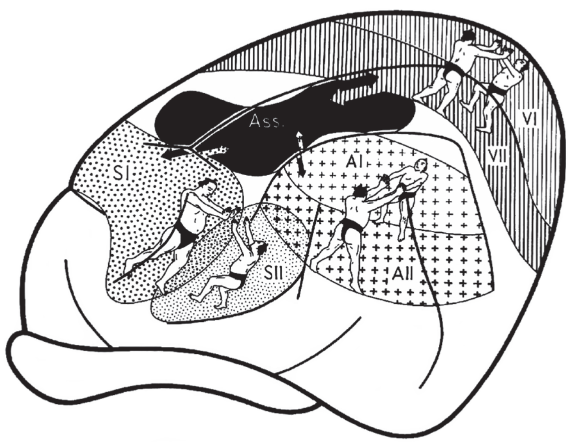


Рис. 10.3. Принцип оппонентности активности различных областей головного мозга кошки, представленный в виде состязания борцов сумо [Kawamura, 1972]

го выше. Отличия состояли в том, что испытуемые были разделены на две группы; одной группе мы предъявляли тридцать шесть разных лиц, а второй группе — лицо одного и того же человека. Остальные условия сохранены. Так, в фазе 2 предъявляли лица с мимической экспрессией, ориентированные в разные стороны, а в фазе 1 — нейтральные прямо ориентированные лица. Для оценки работы механизма привыкания в условиях многократного предъявления стимулов двести *EPI*-последовательностей были разделены на две части; первая и вторая половины исследования длились по 6,25 минут каждая. Оценку локальной активности относительно целого мозга проводили методом двухкомпонентного *t*-теста (*t*-критерий Стьюдента, $p < 0,01$). На цветной иллюстрации 10.3 представлена локализация областей мозга, значимо изменяющих свою активность в условиях многократного предъявления изображений разных лиц.

Видно, что уровень активации возрастает во второй половине исследования. При вычитании: фаза 2 — фаза 1 (на иллюстрации обозначено красным цветом) общая активация в первой и второй половинах исследования существенно не меняется. Наблюдается небольшое увеличение активации в премоторной и теменной областях. Исключение составляют нижняя фронтальная извилина и BA9. Данные зоны во второй половине исследования (цветная иллюстрация 10.3 б) демонстрируют значительное увеличение активации в сравнении с первой половиной (цветная иллюстрация 10.3 а). При вычитании: фаза 1 — фаза 2 (на иллюстрации обозначено зеленым цветом) наблюдаются более существенные изменения. Так, во второй половине исследования происходит значительное увеличение активации во всей сети базового режима, особенно в области медиальной префронтальной коры.

На цветной иллюстрации 10.4 представлена локализация областей мозга, значимо изменяющих свою активность в условиях многократного предъявления изображений одного лица.

Видно, что уровень активации, наоборот, уменьшается во второй половине исследования. При вычитании: фаза 2 — фаза 1 в первой половине исследования наблюдается сильная активация практически во всей сети распознавания лиц. Во второй половине исследования наблюдается снижение активации практически во всех зонах. Небольшая активация сохраняется в основном только в области премоторной (BA6) и теменной коры (BA40). При вычитании: фаза 1 — фаза 2 во второй половине исследования снижается активация в области медиальной префронтальной коры. Активация в области задней поясной извилины существенным образом не меняется.

Полученные результаты подтверждаются и графиками средних значений активированных вокселей (рис. 10.4). Смешанный дисперсионный анализ (Test of Betweens-Subject Effects) и тест парных сравнений (Pairwise

Cpmparisons) показали статистически значимое отличие количества активированных вокселей по различным экспериментальным факторам. Так, суммарно по фазам исследования во второй половине исследования количество активированных вокселей в условиях предъявления одного лица статистически значимо меньше в сравнении с условием предъявления разных лиц (одно лицо < разные лица, $*p = 0{,}05$).

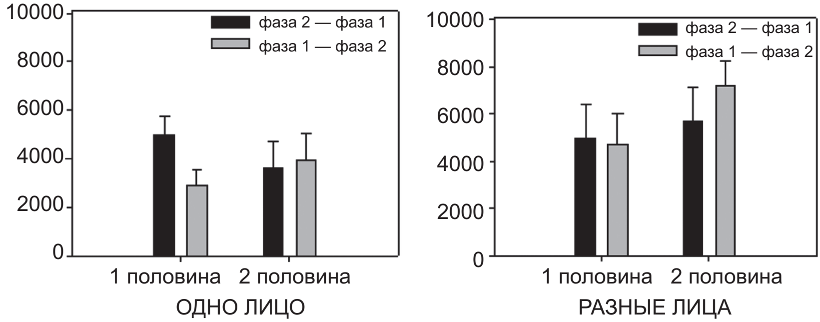


Рис. 10.4. Зависимость среднего количества активированных вокселей от различных типов вычитания и половины исследования в рамках разных экспериментальных парадигм: предъявление одного и разных лиц на группе добровольцев (*N*-23)

Далее было проанализировано количество активированных вокселей на каждом отдельном срезе по группе добровольцев. Сравнивали первую и вторую половины для каждого фактора исследования. Критерий Вилкоксона (Wilcoxon Signed Ranks Test) для зависимых переменных показал статистически значимые отличия во фронтальной (BA9), премоторной (BA6), теменной коре (BA40 и BA7), а также в области передней поясной извилины. Таким образом, мы видим, что в условиях предъявления одного и того же изображения лица человека происходит значительное снижение активации во второй половине исследования, что позволяет сделать предположение о развитии адаптации при монотонном предъявлении. Это означает, что при реальном общении с одним и тем же собеседником у наблюдателя со временем происходит адаптация к особенностям мимики. Это не сказывается при получасовой работе на правильности оценки наблюдателем таких важных для невербального общения элементов, как наличие улыбки или поворота лица собеседника, но дальнейшая работа может нарушить распознавание. Поэтому в обиходе и говорят «важно первое впечатление». В условиях предъявления разных лиц уровень кровотока во второй половине исследования не только не понижается, но и значительно увеличивается, это позволяет сделать предположение, что операторы

в рассматриваемой экспериментальной парадигме испытывали постоянную активацию. Полученные данные демонстрируют, что человеку тяжело работать с потоком чередующихся лиц разных людей, их оценивать и принимать решения, как это было проведено в наших исследованиях. Возможно, что при длительной повседневной работе с разными людьми врачи, воспитатели, преподаватели, юристы, кассиры, продавцы поначалу могут испытывать элементы нервно-психического напряжения.

Представление о том, что восприятие эмоций в изображении лиц включает различные стадии обработки информации и взаимодействие разнесенных в пространстве областей мозга, позволяет предположить, что эти процессы могут быть разделены также и во времени. В последние годы проблеме изучения временных характеристик распознавания эмоциональных выражений лиц посвящено множество исследований с помощью ЭЭГ и магнитной энцефалографии (МЭГ).

Согласно существующим представлениям, специализированные нейронные системы в нижневисочной области активируются через 150–200 мс после предъявления лиц, что отражается в волне вызванного потенциала N170 [Bentin et al, 1996]. Аналогичные данные были получены на пациентах с вживленными электродами в нижнюю латеральную височную область [Allison et al., 1994; McCarthy et al. 1999]. Предполагается, что эти ответы отражают активацию ранних процессов описания, восприятия и категоризации лиц [Schweinberger et al., 2002]. Так, в исследовании Кануникова и Фомичевой было обнаружено, что компоненты P100 и N170 вызванных потенциалов на лица имели устойчивые амплитуды и латентные периоды, которые не менялись в зависимости от типа стимулов («преступник», «жертва», «свидетель», «незнакомые лица») [Кануников, Фомичева, 2015]. Была выявлена трехкомпонентная структура вызванных потенциалов на лица, в которой компоненты P100 и N170 не реагировали на эмоциональный прайминг, в то время как компонент P200 оказался чувствительным к нему. Обнаружена более высокая амплитуда компонента P200 в правом височном и затылочном отведениях у категории «преступник» по отношению к категориям «жертва» и «свидетель». Полученный результат подтверждает тот факт, что компоненты P100 и P170 отражают идентификацию лица. В соответствии с этой точкой зрения многие исследования показали, что на волну N170 не влияет выражение лица [Eimer, Holmes, 2007], но влияет ориентация [Ashley et al., 2004]. Аналогичные результаты получены Балкони и Луччиари [Balconi, Lucchiari, 2005], которые при сопоставлении испуганных, счастливых, печальных и нейтральных лиц не обнаружили различий в N170 в отношении эмоционального содержания.

Однако некоторые данные все же указывают на эмоциональную составляющую волны N170. Так, была показана чувствительность волны N170

к выражению ужаса [Campanella, 2002], отвращения и счастья [Ashley et al., 2004]. Но все же большинство исследователей сходятся в том, что восприятие эмоционального выражения лиц происходит на более поздних этапах. Так, различия в восприятии нейтральных и эмоционально окрашенных изображений лиц были обнаружены в волне вызванного потенциала P300, регистрируемой в центрально-теменных областях через 300 мс после предъявления стимула [Campanella et al., 2002; Schupp et al., 2004]. Причем некоторые поздние реакции вызванных потенциалов на эмоциональные лица продолжались в течение относительно долгого времени — до 1000 мс. Такие продолжительные реакции, вероятно, отражают процессы, запускаемые стимулами при необходимости принятия решений. Решения могут быть связаны не только с лицами, но и изображениями других объектов.

В наших исследованиях стимулами служили матрицы, составленные из решеток Габора (10 × 10), и наблюдатель должен был определять доминирующую ориентацию и нажимать кнопку пульта ответа испытуемого. Развивалась поздняя волна, от 500 до 1000 мс, то есть развивалась уже после моторного отклика. Она могла коррелировать с процессом принятия решения и выполнения двигательного ответа, происходящего обычно через 500 мс после предъявления стимула. Мы сопоставляем эти поздние низкочастотные волны с тем, что в условиях наблюдения происходит сравнение уже принятого решения с остающимся в поле стимулом. Вероятно, «наша» поздняя низкочастотная волна отражает работу некоего компаратора, сравнивающего устройства [Шелепин и др., 2011]. Если стимул предъявляется длительностью всего 100–200 мс, а затем стимула в поле зрения нет, то и этой волны нет. Интересно, что в аналогичных условиях тестирования мы можем видеть активацию областей мозга, которые включают в себя активацию поясной извилины по данным фМРТ и косвенно по данным электрофизиологическим. «Наша» поздняя волна, может быть, отражает процесс оценки собственного решения наблюдателем после ответа. Развитие этой волны напоминает по закономерностям работу известного физиологического механизма обнаружения ошибок [Bechtereva et al., 2005]. В психологической литературе эти процессы приобрели название оценок уровня риска уже принятого решения [Tversky, Kahneman, 1981].

Другим важным фактором является уверенность или неопределенность при принятии решения, принимая во внимание вероятность происходящих событий [Clark, 2009]. Ранее функциональное картирование мозга было проведено для изучения эмоционально-познавательного взаимодействия [Damasio 1990; Northoff; 2004]. Наша задача состояла в более конкретных исследованиях процесса принятия решений в условиях неопределенности, причем неопределенность связана со структурой тестового изображения [Шелепин и др., 2011].

Оценка эмоционального состояния другого человека с помощью мимики лица является важнейшей задачей на всех этапах обработки информации: от низших каскадов до высших каскадов. В целом все указанные структуры участвуют в моделировании психического состояния другого субъекта. В то же время вопрос о роли каждой из них активно обсуждается. Особо следует подчеркнуть тот факт, что данные системы не существуют сами по себе, а только во взаимодействии друг с другом. Причем, как показал теоретический анализ экспериментальных данных, одна и та же зона головного мозга может включаться в разные системы. Это позволяет предположить, что, во-первых, существует сложная система совместно работающих зон мозга, каждая из которых вносит свой специфический вклад в осуществление психических процессов, а во-вторых, каждая из этих зон мозга может вовлекаться в реализацию нескольких различных функций в зависимости от инструкции и экспериментальных условий. Функциональное построение нейронных сетей создает удивительный узор их активности — разный узор для разной ситуации и специфичный для определенной экспериментальной ситуации. Специфичность узора сплетения многоуровневой и многозвенной нейронной сети в момент решения испытуемым поставленной перед ним задачи определяется самой задачей, затем стимулами-изображениями, их физическими, геометрическими и семантическими характеристиками, и наконец, структурами глаза и зрительного мозга, обеспечивающими восприятие мимики человека, оценку положения головы, то есть средствами невербальной коммуникации.

ГЛАВА 11

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ ЧТЕНИЯ

11.1. РОЛЬ ОППОНЕНТНЫХ СИСТЕМ В ЧТЕНИИ

Проблема извлечения и интерпретации информации в тексте является ключевой, поэтому исследования механизмов чтения постоянно привлекают внимание исследователей. Особый интерес представляет изучение текста как многоуровневой структуры, доступной осознанному и неосознанному восприятию и пониманию, скажем, по аналогии с изображениями гештальта в пространственной, временной и смысловой форме. Если рассматривать текст как гештальт, то можно его сравнивать с механизмами построения гештальта в области изображений сцен, объектов, абстрактных фигур. Проведенный анализ материалов по изучению психофизиологии ассоциативных процессов при восприятии визуальных образов и текстовой информации неизбежно приводит нас к работам в области нейролингвистики. Если рассматривать язык как важнейший, ключевой элемент архетипа, естественно, и текст как визуализация языка будет являться ключевым атрибутом архетипа. Язык влияет на построение картины мира его носителями. И. А. Бодуэн де Куртенэ, А. А. Потебня еще в XIX веке начали закладывать основы нейролингвистики, связь которой с нейроиконикой прослеживается не только в общности названия, но и многих общих идеях, в попытках объяснения картины мира. Структурализм в лингвистике возник одновременно с гештальтпсихологией. Н. С. Трубецкой ввел представление о бинарных оппозициях в лингви-

стике [Trubetzkoy, 1936; 1939; Цит. по: Трубецкой, 1960]. Ю. М. Лотман и московско-тартуская школа семиотики применили бинарные оппозиции в исследованиях различных культур, ритуалов и архетипов. В физиологии аналог принципа бинарных оппозиций — это принцип оппонентности.

Принцип оппонентности заложен в основе любой деятельности организма вообще и в основе работы зрительной системы, в частности. Существуют разные реализации этого принципа. Мышцы-антагонисты были известны еще в древности. В зрительной системе оппонентные системы являются основой ее деятельности — это и оппонентность света и тьмы, и цветооппонентность, ориентационная оппонентность и оппонентность в принятии решений.

При чтении работа оппонентных систем наглядно проявляется как при самом процессе чтения, так и в его понимании. Иными словами, физиологию чтения невозможно изучать без понимания «бинарных оппозиций». Изучение работы с текстами требует конвергенции знаний физиологии зрения и лингвистики. Взаимопроникновение этих наук произошло давно, строго говоря, еще до того, как эти науки стали пониматься в современной трактовке. Создание письменной речи — столь величайшее достижение, что эта деятельность сравнима с пониманием физической картины мира или биологических явлений.

В контексте данной книги об нейроиконике мы можем говорить лишь о некоторых процессах зрительного восприятия и нейрофизиологических механизмах восприятия и понимания текста. Тексты — это изображения, несущие речевую информацию, они являются продуктом и частью мыслительной деятельности человека. Тексты — это вполне определенный класс изображений, исследования которых немыслимы без привлечения не только нейроиконики, но и нейролингвистики, ведь для умеющих читать текст — это письменная речь. А письменная речь — это удивительная область взаимовлияния зрения и речи. Особый тип движений глаз по странице, характерный только для чтения, и есть область взаимных интересов.

В процессе обучения чтению человеку необходимо освоить сканирование строк. Есть еще тип чтения по отдельным словам или их фрагментам, предъявляемым последовательно во времени, но это совершено особый тип чтения. В обеспечении чтения участвуют разные этапы обработки зрительной информации и движений глаз. Движения глаз во время чтения — это чередование саккад, фиксаций взора, микросаккад. Саккады перемещают взор по тексту, во время фиксаций происходит распознавание символов, их организация в морфемы и слова. Воспринимаемые символы преобразуются в фонемы, фонологические процессы, которые затем обеспечивают процессы обработки текстовой (языковой) информации, приводящей к пониманию смысла текста.

Движения глаз, а зачастую и неосознанные движения губ, мимика во время чтения, перераспределение активности мозга — все это физиологические показатели, связанные с реализацией языковых функций. Они представляют собой отражение работы разных механизмов, обеспечивающих чтение и понимание прочитанного.

Анализ текста включает физический, лингвистический, статистический, информационный, психологический и, наконец, физиологический уровни. Интерес представляет взаимосвязь когнитивных характеристик текста и его психоэмоционального содержания. Для физиологических исследований зрительного восприятия важны статистические характеристики текста.

Чтение представляет собой выработанный в процессе обучения с учителем навык, который обеспечивают разные элементы зрительной и глазодвигательной систем. Этот навык не дается от рождения. Именно поэтому исследование механизмов чтения, обучения чтению, взаимодействия статистических и семантических свойств текста представляют значительный интерес для современных нейротехнологий работы нейронных сетей.

11.2. АРХИТЕКТУРА НЕЙРОННОЙ СЕТИ, ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИЮ О НАПРАВЛЕНИИ ВЗГЛЯДА ПРИ ЧТЕНИИ

Технологии регистрации и анализа движений глаз широко применяются при проведении научных, диагностических и маркетинговых исследований для изучения психофизиологических реакций на предъявляемые зрительные стимулы. Для осуществления исследований необходимо дорогостоящее оборудование, требующее предварительной калибровки для каждого пользователя, а также зачастую дополнительных креплений, шлемов и т. д. Указанные требования приводят к ограничению сферы применения технологии определения направления взора (eyetracking, айтрекинга). К перспективным областям применения следует отнести системы расширенной реальности и интуитивно понятные человеко-машинные интерфейсы. Было проведено исследование возможности реализации новых технологий искусственных нейронных сетей и на основе данных, полученных с камеры, встроенной в корпус пользовательского устройства, оснащенного монитором. Предложена технология определения направления взора на экране монитора посредством анализа снимков, получаемых с видеокамеры, направленной на пользователя, без использования специализированного дополнительного оборудования. Для решения задачи авторы работы предложили комбинирование сверточной нейронной сети,

извлекающей высокоуровневые признаки изображений, с нейронной сетью долгой краткосрочной памяти, учитывающей временную динамику глазодвигательной активности. Для обучения модели была собрана представительная база данных видеопоследовательностей с эталонной информацией о направлении взгляда. Эксперименты подтвердили, что учет временной информации увеличивает точность регистрации направления взгляда [Малахова и др., 2018].

В большинстве современных систем айтрекинга применяются камеры высокого разрешения, фиксирующие движения глаз с использованием подсветки ближнего инфракрасного диапазона. Лучи направляются в зрачок, отражаются от роговицы глаза, вызывая свечение, которое регистрируется камерой. Такие измерения обычной камерой невозможны, так как в видимом световом диапазоне из-за бликов теряется возможность однозначного разделения зрачка и роговицы глаза. Разработка технологий, не использующих специализированные устройства, существенно расширяет области их применения. Эти устройства должны по изображению определить не только положение головы и глаз, но и положение зрачков. В связи со сложностью поставленной задачи перспективным направлением является применение наиболее мощного (в настоящее время) инструмента автоматического анализа изображений — сверточных нейронных сетей.

Применение сверточных нейронных сетей позволяет обойти указанные ограничения, поскольку такие архитектуры позволяют формировать внутри себя структурные описания изображения, инвариантные к большому числу различных преобразований. Паттерны движения глаз человека являются характерными при решении различных задач. При чтении глаза человека двигаются по строчкам текста со значительными отклонениями. Применение обученных нейронных сетей позволяет извлекать и учитывать эту информацию, что потенциально может помочь повысить точность прогноза.

Нейронную сеть обучали на выборке из 2,5 миллионов кадров, собранных от более чем 1450 человек в процессе пользования портативными устройствами. Авторы старались добиться устойчивой работы с разными пользователями и устройствами. Фрагменты изображения подаются в отдельные подструктуры сети (сверточные подсети), информация из которых затем объединяется на последующих полносвязных слоях, где принимается решение о направлении взгляда. На следующем этапе была собрана база данных, в которую включены записи тридцати двух респондентов, выполнявших шесть видов типичных для ежедневной работы с компьютером заданий. В нескольких видах заданий пользователи получали широкую свободу действий, тем самым обеспечивалась естественность полученных данных. Суммарный объем видеозаписей составил 19 часов. Для

учета временных паттернов движения глаз из изображений при помощи уже обученной сверточной нейронной сети извлекали признаки (активации предпоследнего слоя), которые затем подавали на вход сети с использованием «долгой краткосрочной памяти». Расширение рекуррентных архитектур с помощью «долгой краткосрочной памяти» является чрезвычайно популярным средством обработки сигналов, где требуется выявление долгих временных зависимостей. Согласно этому подходу, нейронная сеть получает возможность фиксировать активность нейрона на неопределенно долгое количество времени посредством управления специальными сигналами для «записи», «чтения», «сохранения» и «стирания». При этом важно, что процесс подачи сигналов также настраивается в процессе обучения алгоритмом обратного распространения ошибки. Общая архитектура предлагаемого решения, учитывающего временные особенности глазодвигательной активности, представлена на цветной иллюстрации 11.1.

В настоящее время решения на основе больших сверточных нейронных сетей позволяют определять направления взора по изображению в реальном времени. Для учета временной динамики глазодвигательной активности задачи было предложено комбинировать СНС со слоями долгой краткосрочной памяти. Согласно экспериментам, учет такой динамики позволяет уменьшить на 10 % среднюю ошибку восстанавливаемого направления взора [Малахова и др., 2018].

11.3. ВЛИЯНИЕ КОНТРАСТА, РАЗМЕРОВ И УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ТЕКСТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧТЕНИЯ

Показано, что физические и геометрические характеристики текста, а также параметры освещенности текста и поля определяют оптимальную зрительную работоспособность в процессе чтения. Подборы шрифта для оптимизации работы с текстом, и наоборот, подачи текста на пороге видимости, для управления поведением известны давно. Во втором издании своей книги «Глаз и его работа» С. В. Кравков дал подробный анализ исследований влияния условий освещения на распознавание знаков и текстов. Каждое издание книги этого автора неповторимо [Кравков, 1936; 1950]. Обширный обзор исследований восприятия различных типов шрифтов и компоновки текста был сделан в начале 1940-х годов [Luckiesh, 1944].

Были установлены основополагающие физические и геометрические характеристики букв для их оптимального распознавания. Психофизические исследования были проведены в разных лабораториях с текстами, преимущественно отпечатанными кеглем из набора шрифтов Бодони.

Объект, обладающий околопороговой или допорогой видимостью, станет легко различимым, если значение одного или нескольких факторов увеличится. Подпороговый сигнал в одних условиях или по одним параметрам может оказаться пороговым и надпороговым, например при увеличении размера, яркости, освещенности поля зрения.

Заметим, что в ряде случаев, если наблюдатель не осознает наличие шрифта, это не означает, что данный шрифт не проходит в мозг по другим каналам: ввод пространственной низкочастотной и временной высокочастотной информации обеспечивает возможность ее неосознанного восприятия, влияющего, однако, на дальнейшее поведение. Знаменитая книга Дж. Бодони (1740–1813) содержит шрифты разного размера и разного контраста. Комбинации разных шрифтов формируют текстуру. Нами было показано, что разные шрифты вызывают активацию разных каналов зрительной системы. Они связаны с разными характеристиками зрительной функции, полученными по результатам измерений порогов контрастной чувствительности и остроты зрения. Большие слабоконтрастные шрифты воспринимаются преимущественно магносистемой. Если их дополнительно размыть, то будет активирован только магноканал. Из представленных комбинаций шрифтов художники-полиграфисты делали самые разные текстуры — структурированные поверхности, а из них формировали узоры и даже портреты.

Очевидно, что конечной целью чтения являются извлечение и использование информации, понимание текста. Процесс чтения включает восприятие, распознавание, понимание, принятие решений и при необходимости осуществление действий. Понимание контекста зависит от физических свойств текста, возможности его распознавания. Яркость слова, фразы при чтении обеспечивается не только точностью восприятия отдельных знаков, но и влиянием. Задействуются все оптические характеристики, размер и контраст знаков текста (букв, цифр, вспомогательных и математических символов), плотность упаковки знаков, шрифт, освещенность поля и даже цвет знаков и поля. При проведении исследований когнитивных механизмов понимания текста надо учесть целый ряд ограничений, связанных с особенностями зрительно воспринимаемой информации на первых каскадах приема зрительной информации. Надо знать качество оптики глаза испытуемых. Некоторые нарушения оптики требуют ее корректировки для чтения вблизи на расстоянии 40 см. При чтении происходят вполне определенные движения глаз, захвата группы букв и их восприятие, затем объединение в целое, в многоуровневый гештальт — слово, предложение, текст (рис. 11.1).

Представленные (рис. 11.1) значения позволяют практически в любых условиях определять видимость знаков. Следует заметить, что видимость

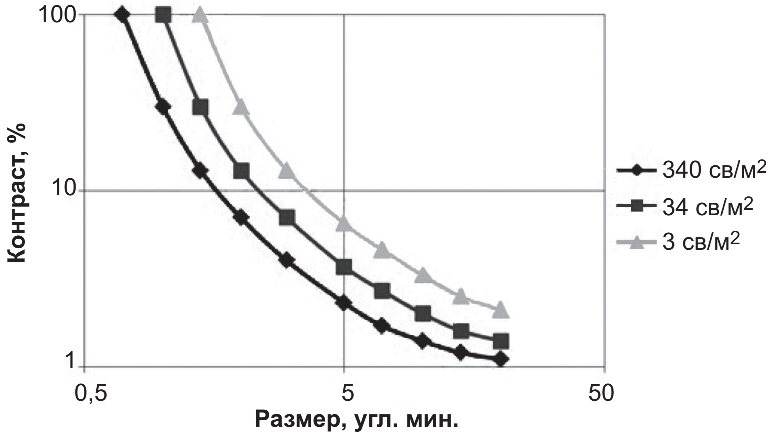


Рис. 11.1. Зависимость порога видимости от контраста (ось ординат) и размера изображения букв (ось абсцисс) для трех уровней яркости (обозначения на графике) [Luckiesh, Moss, 1944]

знаков и эффективность распознавания и, более того, эффективность чтения, — это не одно и то же. Однако, имея эти данные, мы всегда можем знать, видит человек буквы в тексте или нет. При этом, если увеличивать размер знаков (двигаться вправо по оси абсцисс), так что знаки будут более одного градуса, эффективность чтения будет снижаться. Это определяется возможностью захвата фовеолой одновременно несколько знаков. Число захваченных одновременно букв определяет пропускную способность фовеолярного зрения при чтении.

11.4. ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ОСВЕЩЕНИЯ, ЦВЕТА ФОНА И ЦВЕТА ЗНАКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧТЕНИЯ В НОРМЕ И ПРИ ДИСЛЕКСИИ

С. В. Кравков еще в 30-е годы прошлого столетия привел данные Л. И. Мкртычевой и соавторов, исследовавших роль цвета фона для зрительной работоспособности в процессе чтения. Ими были установлены оптимальные соотношения желтого фона и черного шрифта для чтения [Кравков, 1936]. Более того, оказалось, что можно подбирать оптимальные индивидуальные соотношения. Современные исследователи указывают, что общая работоспособность повышается при использовании све-

тофильтров [Зак и др., 2012; Островский и др., 2001]. Важно отметить, что на скорость чтения большое влияние оказывает цвет освещения рабочего поля и всего поля зрения.

Как уже было отмечено, роль цветового фона привлекала исследователей давно. В XIX веке уже можно было окрашивать и калибровать фон поверхности, на которую наносили изображение, менять цвет объекта, в том числе шрифтов. При оптимальном для чтения соотношении цвета фона и букв (черные буквы на желтом фоне) отмечалась самая высокая острота зрения. Однако не всегда в естественных условиях такие соотношения (темный верблюд на фоне желтых песков виден далеко) наблюдаются в природе, скорее наоборот, они встречаются редко. Поэтому с целью увеличения остроты зрения было предложено создавать слегка желтоватый фон при разглядывании объектов. В начале XX столетия для артиллеристов в русской армии впервые в мире были созданы очки с желтыми светофильтрами — их называли «консервы» из-за особенностей оправы. Еще в первые годы XX века в Императорской военно-медицинской академии были защищены две докторские диссертации на тему важности желтых очков. Тогда же в академии на кафедре психиатрии В. М. Бехтерев впервые в мире создал комнату для цветолечения.

Интерес к цвету освещения при чтении возрос в конце XX века благодаря работам А. Вилкинса. Было обнаружено, что повышением зрительной работоспособности при чтении можно управлять, подбирая индивидуально цвет световой окраски рабочего поля. Показано [Wilkins, 2000], что в среднем скорость чтения при оптимальном для конкретного наблюдателя свете выше в два раза, чем при белом (источник света D65, 25 cd/cm^2). Скорость чтения при неоптимальном цветовом освещении была выше всего на 21 % по сравнению с освещением белым цветом, что было несущественно. Таким образом, большинство цветов не сильно влияют на скорость чтения, хотя при выборе оптимального цвета скорость чтения увеличивается существенно. При этом, как было показано, для каждого испытуемого этот оттенок будет индивидуален.

Интересно отметить в этих опытах, что цвет света, который связан с медленным чтением, как правило, был белый. Скорость чтения при белом свете и окрашенном различна. Есть выраженные индивидуальные отличия [Wilkins, 2000]. Свои исследования Вилкинс проводил следующим образом: текст освещался светом различного цвета, использовалось устройство плавного изменения цвета; затем измерялась скорость чтения и строилась зависимость скорости чтения от изменения цвета. После этого, основываясь на результатах измерений, Вилкинс подбирал цвет для стекол очков испытуемых и предлагал использовать их для снятия симптомов зрительного напряжения. Работа в окрашенном свете оказалась полезной для преодоления

дислексии. При мигрени использование цветных фильтров приводит к ее снижению. Это интересно, учитывая некую общность между дислексией и мигренью, а также мигренью и эпилепсией. У некоторых индивидуумов с дислексией наблюдается магноцеллюлярная недостаточность. Считается, что при наличии такого дефицита благотворное влияние оказывают цветные фильтры [Wilkins, 2000]. При аутизме происходят нарушения цветового зрения [Zachi et al., 2017]. Цветные, спектральные фильтры увеличивают скорость чтения у лиц с аутизмом. При черепно-мозговых травмах [Wilkins, 2000], при мигрени [Wilkins, 2003], при эпилепсии, то есть расстройствах, которые связаны с корковой возбудимостью, также наблюдаются положительные терапевтические воздействия на поведение человека и на характеристики чтения. Может быть, люди, страдающие мигренью, обладают магноцелюлярным дефицитом [Wilkins, 2000; 2003].

Известно предположение о механизме влияния цветных фильтров как перераспределении активности в магно- и парвоканалах зрительной системы. В более общем виде происходит перераспределение активности между каналами, обеспечивающими осознаваемую и неосознаваемую информацию в процессе восприятия, что улучшает состояние больных.

Даже только управляя цветом освещения, оказывается, можно осуществлять баланс между глобальным и локальным описанием, а в ряде условий — между осознанным и неосознанным восприятием. Но лишь в некоторых случаях эти явления можно сводить к «бинарным оппозициям» между магно- и парвосистемами.

Для большинства взрослых после обучения и длительной многолетней тренировки чтение становится чрезвычайно легким, автоматическим процессом. Однако даже в развитых странах мира иногда до 10 % населения не может успешно освоить навык чтения. Из всего многообразия работ по дислексии нас интересует осознанное и неосознаваемое испытуемым управление его состоянием при чтении.

Проблема организации восприятия текста заключается в том, чтобы понять, почему мы воспринимаем знаки, слова, строки, страницы и смысл. Обратимся к законам гештальта и принципам группировки. Цвет может легко влиять на организацию процессов чтения и распознавания слов, предложений. Б. Пинна и его коллеги Е. Шелепин и К. Деяна изучили влияние разрозненной окраски букв слогов слов на базовые характеристики чтения в норме и при дислексии [Pinna et al., 2016].

Цвет может облегчать построение гештальта, а может вызывать фрагментацию изображения. Пинна с коллегами ввели термин «хроматическая акцентуация». Они использовали цвет как в построении целостного, так и фрагментированного текста. Маркером цвета в Word мы постоянно выделяем интересующие нас места, объединяем слова, предложения, абзацы

для привлечения внимания к данному фрагменту текста. Таким образом, цвет обеспечивает синергическое или антагонистическое взаимодействие фрагментов текста (и вновь мы приходим к работе бинарных оппозиций в тексте). Ожидается, что цвет может влиять на группировку и другие механизмы, обеспечивающие цельность и фрагментацию в чтении.

Кстати, естественная для современного человека фрагментация текста, а именно — разбиение текста, не была совершенно очевидной в древности, пометки были в греческих текстах, но практически отсутствовали в латинских. Чтение осуществлялось преимущественно вслух, звучание создавало ритм, фрагментацию и одновременно целостность восприятия и понимание текста. Возникновение молчаливого чтения в результате разбиения текста — это одно из величайших достижений Средневековья [Saenger, 1997]. Процесс молчаливого чтения развивался медленно, эволюционным путем, вместе с развитием технологий работы с текстами; и казалось, он был завершен к началу массового книгопечатания. Наступившая эра доступных цифровых технологий продолжает возможность совершенствования представления «изображений» текста. Мир текста как изображения всегда был частью мировой культуры. Казалось, эра книгопечатания его унифицировала, упростила. Но мы знаем, что это не так. От инкунабул, отпечатанных металлическими наборными шрифтами, до текстов, отпечатанных на лазерных принтерах, видно разнообразие изображений текста. Поэтому совершенно неудивительны постоянные психофизиологические исследования шрифтов и маркеров как добавок к разнообразным шрифтам [Luckiesh, Moss, 1944]. В частности, интерес представляет техника хроматической акцентуации на основе раскрашивания слогов и букв текста, предложенная Б. Пинной и его коллегами, что открывает новые возможности в перегруппировке и фрагментации текста для облегчения его понимания, помимо существующего принципа формирования текста с разрывами между словами [Pinna et al., 2016]. Раскрашивание текста открывает возможность управления его распознаванием и пониманием. Предложенный принцип может быть реализован помимо цвета яркостью, контрастом, толщиной и формой букв, их размером. Предложенный инструмент является интересным не только для физиологических исследований, но и в практике обучения при дислексии, для проверки магноцеллюлярной теории дислексии. При некоторых формах дислексии действительно наблюдается дефект магноцеллюлярной системы. Развитие магноцеллюлярных слоев наружного коленчатого тела у пациентов с дислексией является аномальным. Чувствительность к движению уменьшается. У некоторых людей есть снижение внимания к левому полуполю зрения [Pinna et al., 2016]. Это снижение внимания является критичным для обучения чтению в европейской традиции.

Пинна с соавторами сравнивали чтение детей в возрасте 7–10 лет; в исследовании приняли участие двадцать обученных чтению детей и двадцать — с дислексией. Текст, используемый в качестве стимула, был хорошо известен детям. Использовали четыре хроматических условия Монохромат — однородная окраска одним цветом (одним из шести) всех букв текста; слово — окрашивание каждого слова своим цветом так, чтобы не было одинаковых соседей; слог — окрашивание каждого слога своим цветом так, чтобы не было одинаковых соседей; буква — окрашивание каждой буквы своим цветом так, чтобы не было одинаковых соседей. Результаты исследований представлены в виде графиков (см. рис. 11.2).

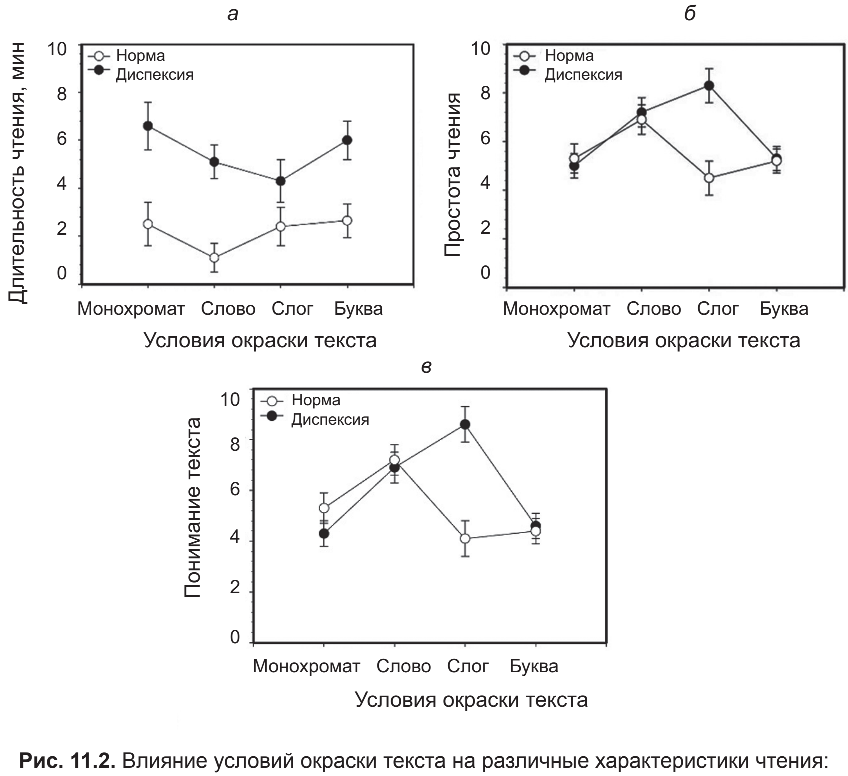


Рис. 11.2. Влияние условий окраски текста на различные характеристики чтения: *а* — длительность чтения текста; *б* — простота чтения; *в* — понимание текста

Исходная гипотеза оказалась плодотворной. Хроматическая акцентуация преодолевает дислексию. Результаты показывают, что цвет сильно влияет на группировку и, как следствие, на длительность чтения и пони-

мание. Хроматическая акцентуация текста улучшает основные характеристики чтения при дислексии.

11.5. ЧТЕНИЕ КАК БИНАРНЫЕ ОППОЗИЦИИ «ПЕРИСКОПИЧЕСКОГО» И «ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО» ЗРЕНИЯ

Чтение — это одна из наиболее интересных форм взаимодействия, чередования активности перископического (панорамного) и телескопического (центрального) поля зрения, а также очередное проявление бинарных оппозиций. Периферия поля зрения запускает бросок глаза вдоль строки на необходимый угол, а фовеа останавливает. В начале броска происходит подавление активности парвосистемы, поэтому нет ощущения смазывания изображения. Сложный, выученный процесс сканирования текста состоит из его восприятия, распознавания и построения целостного образа. Обучение этим важнейшим практическим этапам восприятия и понимания текста и представляет собой важнейшую цель школьного обучения. Причем все эти этапы хоть и кажутся главными для уроков языка и литературы, но в разных формах присутствуют в большинстве преподаваемых дисциплин.

Сканирующие движения глаз — это особый, практически ненужный в дикой природе вид движений глаз. Но именно в процессе чтения глаза читателя совершают сканирующие движения вдоль строк. Они представляют собой последовательность саккад (бросков) и фиксаций взора. Во время фиксаций работает центральное фовеальное зрение. В этот момент фовеола захватывает одновременно от четырех до восьми знаков на строке. Затем глаз переходит к новому броску, который запускает периферия поля зрения вследствие стоящей перед читателем задачи. Бросок глаза запускает крупноклеточная с большими рецептивными полями магносистема, а остановку осуществляет мелкоклеточная с малыми рецептивными полями парвосистема. В результате, чтение — это чередование возбуждения и торможения магно- и парвосистем. Так как магно- и парвосистемы настроены на преимущественно низкие и преимущественно высокие пространственные частоты, нас интересовал вопрос, до каких пор пространственно-частотная фильтрация, размытие текста позволит сохранять этот процесс сканирования и будет ли он сохраняться даже при размытой в результате вейвлетной фильтрации строке текста [Ламминпия и др., 2013].

В работе предъявляли шесть слайдов с текстом, оформленным черными буквами на сером фоне. В среднем слайд содержал шестьсот знаков,

включая пробелы и знаки препинания. Тексты были предварительно подвергнуты вейвлетной фильтрации с помощью многомасштабного разложения изображения с использованием *DoG*-функций (*DoG*, Difference of Gaussians) — вейвлетов, представляющих собой разность двух двумерных функций Гаусса с различной полушириной. Размер вейвлетных элементов зависел от выбранного уровня «пирамиды»: для уровня 1–8 пикселей, 2–16, 3–32, 4–64, 5–128, 6–256 пикселей, что соответствует 0,23; 0,46; 0,93; 1,86; 3,71; 7,42 угловым градусам. Под размером вейвлета подразумевалось расстояние в пикселах (угловых градусах) между двумя минимумами диаметрального сечения вейвлета. Перед наблюдателем стояла задача прочитать текст (или постараться прочитать текст), после чего нажать на кнопку компьютерной мыши. Расстояние от глаз испытуемого до монитора составляло 60 см. В процессе чтения регистрировали движения глаз. Исследовали следующие параметры: количество и длительность саккад и фиксаций, время прочтения, общий паттерн движений глаз, а также зависимость всех этих параметров от размера вейвлетного элемента [Ламминпия и др., 2013; 2014; 2015; 2016].

Время прочтения с ростом вейвлетного элемента, начиная со второго уровня пирамиды, практически равномерно снижается. Это связано с постепенным разрушением структуры текста и его переходом в «узор» из вейвлетных элементов; наблюдатель прикладывает все больше усилий для того, чтобы опознать и прочесть фрагмент текста и затрачивает на это большее количество времени. При фильтрации нарушаются пропорции текста и изменяется пространство между знаками и строками, что, в свою очередь, тоже влияет на скорость чтения. Итак, чем больше время прочтения (меньше скорость чтения соответственно), тем большее количество фиксаций совершают глаза наблюдателя. В среднем на один фрагмент текста читатель совершал двадцать семь фиксаций. Средняя продолжительность фиксации составляла 0,31 сек., что совпадает с данными А. Л. Ярбуса о том, что средняя продолжительность фиксации обычно лежит в пределах 0,2–0,4 сек. [Ярбус, 1965].

Количество фиксаций взора с ростом размера вейвлетного элемента также постепенно снижается, что объясняется все тем же разрушением структуры текста, при котором постепенно исчезают мелкие детали; знаки сначала становятся трудно различимыми и сливающимися друг с другом, а затем исчезают совсем. С ростом вейвлетного элемента постепенно разрушается структура текста (искажается строка, размываются буквы и т. д.) и он превращается в своего рода «картину», а паттерны движений глаз при просмотре картин и при чтении существенно различаются. При просмотре картин, статичных живописных полотен и динамических изображений кинофильмов направление взора постоянно сохраняется во время

всего просмотра в центральной части картины, вернее, в центре композиции с редкими просмотрами различных участков изображения.

Еще А. Л. Ярбусом было показано влияние задачи на паттерн движений глаз: в зависимости от задачи, поставленной перед наблюдателем, изменяются многие параметры [Ярбус, 1965]. Наиболее выраженным является изменение числа саккад. Так, их число минимально при фиксации взором точки, больше — при рассматривании картины и максимально — при чтении. При чтении число саккад возрастает почти в два раза по сравнению с рассматриванием изображения, даже содержащего мелкие детали. Исходя из этого можно рассчитать, что кинетические нагрузки глаза при чтении оказываются больше, чем при выполнении других зрительных задач. При переходе от простых условий чтения простого текста к сложному тексту или тексту в условиях помехи наблюдается укорочение саккад и удлинение времени фиксаций, что обеспечивает лучшее качество анализа текста [Бауэр и др., 2009; Ламминпия и др., 2013].

Известно, что, если фиксировать взор в центре страницы, изображения представляются более четкими, чем на ее периферии, то есть в данном случае на периферии поля зрения. Можно предположить, что разная степень размытия текстов в данном эксперименте соответствует тому, как представлено изображение на сетчатке при удалении от центра поля зрения к периферии на разные расстояния.

Можно предположить, что постепенное размытие текстов вначале нарушает работу парво-, а затем работу магносистемы при чтении. При малом размытии текстов парвосистема получает недостаточно информации для эффективной работы; при значительном размытии структура движений глаз нарушается. Магносистема запускает команду движений глаз, распределение внимания по странице (по дисплею ЭВМ). Парвосистема не может считывать информацию при остановках. Парвосистема при чтении контролирует длительность фиксаций, длину саккад и контролирует количество знаков текста, попадающих в поле зрения за одну фиксацию. При размытии сделать этого она не может. Только согласованная работа магно- и парвосистем определяет стратегию движений глаз по странице при чтении. Тем самым показано взаимодействие парво- и магноканалов зрительной системы в процессе чтения. Пример сканирования текста и остановок взора по строкам см. на рис. 11.3.

С ростом количества фиксаций взора уменьшается количество захватываемых за фиксацию печатных знаков. Время прочтения с увеличением степени разрушения текста в самом начале растет, затем текст становится сложнее для чтения и время прочтения равномерно снижается (рис. 11.4). Аналогичная ситуация наблюдалась при рассмотрении зависимости количества фиксаций от степени разрушения текста.

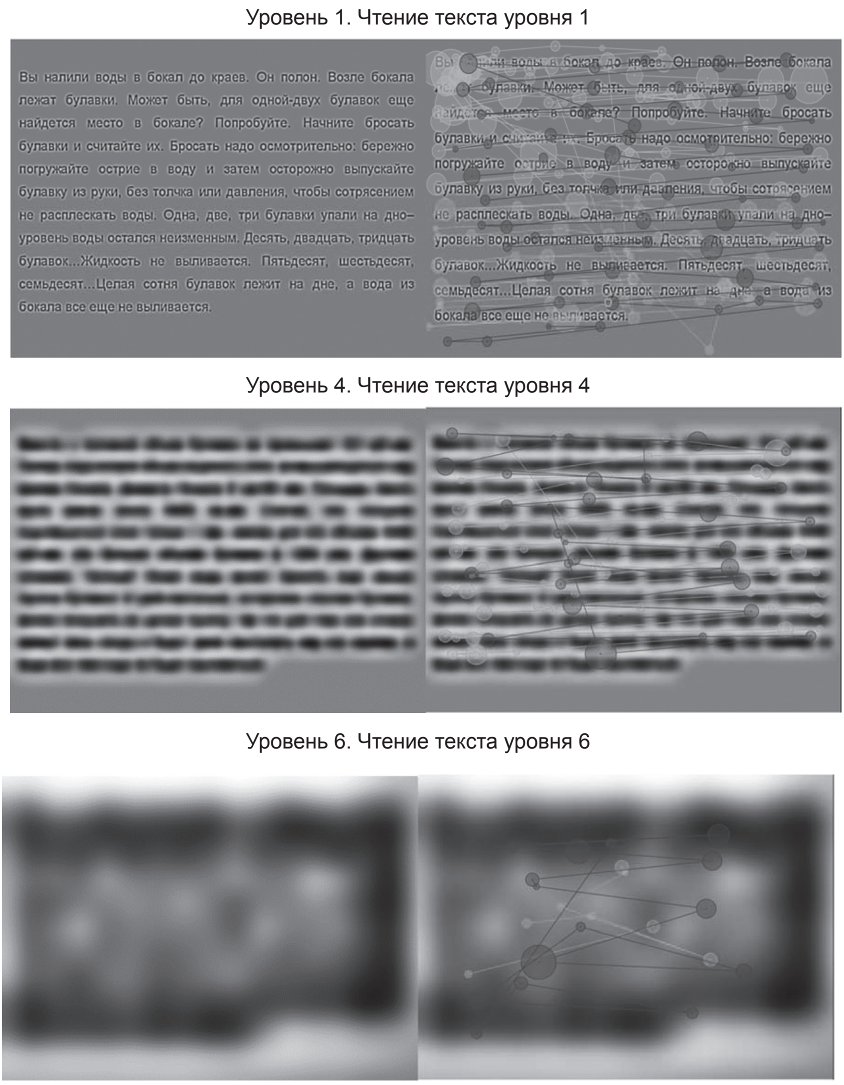


Рис. 11.3. Пример предъявляемых слайдов с текстами. Показаны результаты размытия текстов фильтрами разного размера и тексты с наложенными на них схемами движения глаз двух репрезентативных испытуемых [Ламминпия и др., 2013]

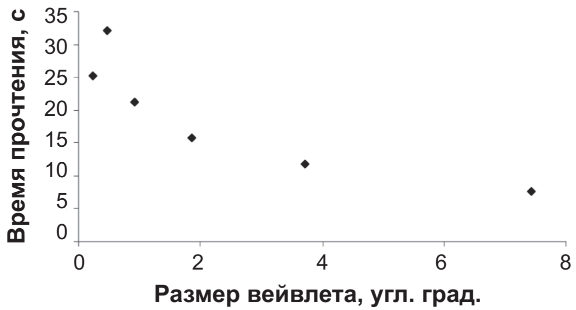


Рис. 11.4. Зависимость времени прочтения текста от размера вейвлетного элемента [Ламминпия и др., 2013]

Полученные данные подтвердили исходную гипотезу о том, что малое размытие текста нарушает вклад парвоканалов, и лишь увеличение размытия нарушает работу еще и магноканалов. Остановка взора при размытии затруднена из-за недостаточной активации парвоканалов. Структура движений глаз нарушается. Стратегию движений глаз определяют именно магноканалы. Глаза продолжают сканировать строки с малым размытием, на остановках «подскальзываются», но до тех пор, пока есть строки, пусть размытые, глаза могут хорошо выполнять имитацию чтения. При значительном размытии, когда строк уже не видно, в соответствии с полностью разрушенной структурой рисунка текста разрушена и структура рисунка движения глаз.

Эти данные позволяют утверждать, что по разным параметрам, и в частности по параметру «длительность фиксации», два разных режима чтения не состыкованы. Это означает, что для создания целостного представления о тексте и для его понимания требуется не только то, что захватывает данное окно, но и ближайшая периферия. Разные люди имеют разное окно захвата числа букв, а в используемой программе его величина была фиксированной. Кроме того, важным оказалось то, какая информация захватывается периферией глаза. Для этого была проведена данная серия исследований и применена вейвлетная фильтрация строк.

11.6. СТАТИСТИКА ТЕКСТА

В исследовании были использованы тексты с заданными статистическими характеристиками как физических свойств изображения текста, так и семантики текста. Грубые различия наблюдаются даже по данным

распределения саккад, которые различны, если текст насыщен глаголами или прилагательными.

Так, при чтении текстов различных групп существенные изменения в характеристиках чтения испытуемого по сравнению с его средними показателями были выявлены: в количестве захватываемых символов (среднее значение и стандартное отклонение в категории «прилагательные» 0,25 ± 0,97; «существительные» 0,29 ± 1,79; «глаголы» –0,54 ± 1,27 от среднего для испытуемого количества символов); в длительности саккады («прилагательные» 0,6 ± 1,08; «существительные» –0,5 ± 1,77; «глаголы» 0,06 ± 1,42, мс); в средней скорости («прилагательные» 0,17±0,38; «существительные» –0,2 ± 0,65; «глаголы» 0,14 ± 0,67, угл. мин./мс) и наклоне скоростного профиля саккады («прилагательные» 0,01 ± 0,03; «существительные» –0,02 ± 0,05; «глаголы» 0,02 ± 0,06). Таким образом, процесс чтения текстов с повышенным содержанием существительных характеризуется снижением средней скорости саккады, более пологим наклоном ее кривой, сокращением длительности саккады по сравнению с текстами, содержащими значительное количество прилагательных, а также увеличением длины саккады в сравнении с текстами, содержащими значительное количество глаголов. Тексты, содержащие избыточное количество глаголов, приводят к уменьшению количества захватываемых символов и в сравнении с существительными к увеличению средней скорости и повышению крутизны кривой саккады. При чтении текстов, насыщенных прилагательными, фиксируется большая длина саккад, чем при чтении текстов с глаголами, а также более высокие средняя скорость, длительность и крутизна кривой саккады в сравнении с текстами с существительными.

Частоты использования прилагательных цвета отражают внутреннее состояние автора. Специфика художественного (в том числе поэтического) текста заключается в том, что его лексические единицы, образуя смысловые группы, обретают знаковый, символический смысл, способность соотнестись с какой-либо областью жизни как автора, так и читателя [Шелепина, 1966].

Исследование движения глаз во время чтения является важным инструментом, позволяющим судить как о процессах зрительного восприятия, так и о языковых процессах. В данном исследовании нами было показано наличие различий в динамике движений глаз при чтении текстовых фрагментов с избыточным содержанием одной из частей речи, что говорит о влиянии синтаксических признаков на процесс чтения. Полученные результаты согласуются с предыдущими работами, подтвердившими влияние части речи и принадлежности слов к закрытой либо открытой синтаксической группе на параметры чтения. Важным направлением исследований языковых процессов является изучение влияния синтаксической неоднозначности текста на скорость чтения, количество регрессионных саккад. В этих работах ана-

лизируются более сложные синтаксические структуры, такие как несогласованные фразы (либо неоднозначные придаточные предложения [Анисимов и др., 2014]. В нашем случае мы опускаем структурное строение предложений и уделяем основное внимание таким базовым признакам, как части речи. В вышеприведенных работах, как и во многих других [Barrett, Sogaard, 2015], при оценке изменений глазодвигательной активности учитываются в основном статические показатели — общее время прочтения, длительность фиксаций, количество прямых и возвратных саккад. Для достижения более глубокого понимания происходящих процессов зрительной и лингвистической обработки текста на уровне отдельных слов или морфем необходимо, как нам кажется, принимать во внимание и динамические характеристики процесса обработки текста, выражающиеся в длине саккадических движений, их скорости, наклоне и пр. Анализ полученных данных показал, что при чтении текстов, насыщенных глаголами, уменьшается среднее количество захватываемых за одну саккаду символов. Одной из причин может являться наименьшая среди групп средняя длина слова — 5–6 символов. Так как глаголы в текстовых фрагментах представлены наиболее короткими словами, но при этом не могут быть опущены как второстепенные части речи [Fitzsimmons, Drieghe, 2011], возникает необходимость осуществления большего количества саккад на фиксированное количество символов. Кроме того, окончания глаголов могут нести в себе важную информацию (род, число, время). Было показано, что при наличии существенной информации в окончании слова вероятность совершения второй фиксации на том же слове возрастает. Процесс чтения текстов с повышенным содержанием существительных характеризуется более низкой средней скоростью саккады и пологим наклоном ее кривой по сравнению с двумя другими группами слов, что, по-нашему мнению, может быть вызвано снижением динамики повествования из-за уменьшения количества глаголов в целом и глаголов действия в частности. Группа же фрагментов с прилагательными имеет существенные различия только в случае попарного сравнения и не характеризуется общим изменением какого-либо признака. Стоит отметить, что различия в чтении фрагментов разных групп не обязательно говорят об определяющем влиянии синтаксических признаков на параметры чтения. Указанные отличия также могут быть спровоцированы семантикой текста. Например, результаты некоторых исследований свидетельствуют о влиянии именно семантического содержания, а не лексического сходства, на паттерны активации в коре головного мозга. Малахова с соавторами постарались исключить влияние семантики, подобрав фрагменты случайным образом из большого объема естественных текстов, однако искусственно составленные тексты также могут представлять интерес для дальнейшего исследования. В случае контролируемой генерации текстовых стимулов будет возможным исключить влияние длины и частотности предъявляемых слов.

ГЛАВА 12

ЗРЕНИЕ И СТРЕСС

12.1. СВЕТ КАК ИСТОЧНИК СТРЕССА

Окружающие нас натуральные и виртуальные сцены, ландшафты, лица, биотехносфера обладают определенными пространственными и временными свойствами. В процессе описания наблюдаемой сцены зрительная система человека анализирует как физические, так и семантические характеристики среды. Конструкция «зрительного мозга» такова, что для оптимальной работы в этой среде выбираются выработанные в ходе эволюции, наиболее значимые для наблюдателя свойства окружающей среды. Имеются определенные пространственно-временные структуры изображений, оказывающие эмоционально положительное и эмоционально отрицательное воздействие на человека.

И вот что важно: простой, всем знакомый яркий свет приводит к стрессу. Стресс вызывает яркий длительный свет, даже не слепящий, не разрушающий сетчатку и не приводящий к ожогам роговицы из-за высокого уровня ультрафиолета. Яркое освещение обычными лампами накаливания днем и ночью в закрытом помещении обязательно нарушит суточный ритм и приведет к стрессу.

Свет и тьма дополняют друг друга, поэтому как бесконечный или слепящий свет, так и необычная темнота вызывает нежелательное состояние у человека. Долгое нахождение в темноте, в условиях неопределенности уже через сутки приведет к стрессу. Люди в сумерках и погруженные в тем-

ноту, могут доходить до непреодолимого, ничем другим не обусловленного страха. Этот безотчетный страх возникает внезапно в темноте или может медленно нарастать и создавать неприятный фон, переходящий в депрессию, например, при сезонных колебаниях солнечного освещения. Страх и депрессию могут вызывать неприятные социальные проблемы, «синхронизированные» с колебанием освещенности. Информация об общем уровне освещенности, о колебаниях этого уровня — суточных и даже сезонных — поступает в супрахиазмальное ядро, из которого управляющие сигналы запускают реакции гипоталамо-гипофизарно-адреналовой системы и, кроме того, управляют выработкой мелатонина в эпифизе.

Помимо общего уровня освещенности окружающей человека среды существенное значение для человека имеют относительно высокочастотные колебания освещенности помещений, рабочего окружения человека и дисплея. Хорошо известно, что плохой дизайн осветительных систем (уровень освещенности, наличие мерцания газоразрядных ламп) приводит к возникновению зрительного дискомфорта [Зак, Островский, 2012]. Мы можем зарегистрировать отклик в мозгу на мерцание ламп с частотой вплоть до 200 Гц. Эти мерцания сказываются не только на функциональной активности мозга, но и в результате изменения биохимических процессов изменяют и анатомическую организацию мозга [Меркульева и др., 2012; 2015; 2016]. Поэтому совершенно недопустимо применение источников газоразрядных или светодиодных источников света, питаемых переменным током, в учебных заведениях, в местах постоянного пребывания детей, моряков на подводных лодках и т. д. Особо опасны сочетания в одном помещении разных источников света с разной частотой мельканий (например, источники освещения и дисплеи ЭВМ). Мелькания жидкокристаллических дисплеев гораздо менее опасны, чем практически исчезнувших электроннолучевых дисплеев. Но мелькания есть и у них, и они опасны. Наличие этих мельканий легко проверить с помощью подручного «стробоскопа» — карандаша, который надо держать в плоскости, перпендикулярной зрительной оси, направленной на дисплей. При уменьшении яркости жидкокристаллического монитора можно получить хорошо заметные промежуточные стоячие, кажущиеся волнами или мгновенными «остановками» между крайними, положения карандаша. Мерцания экрана дисплея отражаются в изменении порога к мельканиям низкой пространственной частоты, соизмеримой с размером экрана. Последствия этих мельканий сохраняются на долгое время [Бойко и др., 1989]. Дисплей помимо временной частоты мельканий всего экрана при работе с текстом вызывает еще одну проблему (ее мы обнаружили много лет тому назад): человек адаптируется к пространственной частоте и ориентации строк; адаптация приводит к изменению порогов восприятия на данной пространственной частоте и это — прояв-

ление взаимосвязи пространственных и временных периодических паттернов, опасных для человека.

Как уже было отмечено, плохой дизайн осветительных систем приводит к возникновению зрительного дискомфорта. Диапазон мельканий, которые чувствует наблюдатель, велик: сверхнизкочастотный, годовой, суточный ритм, видимый за счет памяти и ощущения света и темноты, но не воспринимаемый как мелькания, осознаваемый и видимый как мелькания от 0,1 до 40 Гц и неосознаваемый, но воспринимаемый мозгом ритм мельканий с частотой от 40 до 200 Гц. Вопрос о том, как могут влиять еще более высокие частоты (более 200 Гц) мелькания света, пока в процессе исследования.

С конца 1980-х годов накапливался, и стал уже огромным, материал по влиянию окраски фона на многие психические, когнитивные, эмоциональные, ассоциативные функции. Одним из ключевых исследователей в этой области является А. Вилкинс. Спектральный состав окружающих сцен, цвет, сочетание цветов — это отдельная проблема, рассмотрение которой выходит далеко за рамки нашей книги. Напомним лишь о ценнейшем практическом значении применения цветных очков А. Вилкинсом для снятия стресса, мигрени, лечения дислексии.

Дислексия как неспособность овладеть навыком чтения происходит, несмотря на достаточный уровень интеллектуального, речевого развития и отсутствие нарушений в слуховой и в зрительной системах. А. Вилкинс начал исследование характеристик чтения при освещении окрашенным светом [Wilkins, 1999; 2002]. Он подбирал для каждого испытуемого свой цветовой фон посредством цветных очков или освещения. Можно провести аналогию с существующим психическим цветовым фоном и внутренней картиной мира. Этот внутренний фон мы видим по частоте использования прилагательных цвета, например, в поэзии [Шелепина, 1966].

Психологи, художники, архитекторы уделяют большое внимание окраске помещений жилых, театральных, заводских, торговых и т. д. с целью усиления эмоционального воздействия. Например, зрительный зал Малого драматического театра в Санкт-Петербурге (руководитель театра Л. Додин) окрашен в равномерный черный цвет. Это заставляет сконцентрировать все внимание зрителя на сцене и не отвлекаться на осматривание зала. Исключительно когнитивная цель. Иногда существует необходимость повысить эмоциональное возбуждение без привлечения когнитивной сферы. Красный цвет якобы возбуждает нервную и гипоталамо-гипофизарную системы.

До середины XX века в хирургии доминировал белый цвет, что можно объяснить дешевизной ткани и возможностью визуального контроля ее свежести. Однако повышение мощности освещения операционного поля приводит к нарушениям зрения и быстрому утомлению хирурга, анесте-

зиолога и операционных сестер. Дело в том, что белый цвет увеличивает световой поток за счет отражения, что вызывает дискомфорт. Поэтому соответствующие ткани стали окрашивать в зеленые или синие тона — они меньше отражают свет, воздействуя на эмоциональную сферу, успокаивают врачей и сестер.

Все приведенные примеры окраски фона хорошо известны. Их восприятие частично осознаваемое, но действие фона на наблюдателя, которого хочет достичь разработчик, является для потребителя неосознанным. Так, воздействие красного цвета на гормональную сферу зрителя совершенно неосознанное. Как и для хирурга, перевести взор на темно-зеленую или синюю поверхность субъективно приятно, напряжение несколько снизится, причем снизится неосознанно. Наконец, приведем пример совершенно тривиальный: в помещении, где жарко и стены окрашены в яркие желтые и оранжевые тона, можно ожидать повышение потребления (или покупки) напитков, утоляющих жажду. В холодное время требуется меньше электроэнергии для обогрева помещений, окрашенных в теплые тона, по сравнению с холодными.

Применение цветового фона в клинических условиях указывает на обширные возможности неосознанного долговременного воздействия на психику. В качестве примера можно привести «комнату цвета», созданную В. М. Бехтеревым в Военно-медицинской академии около ста лет назад. В этом помещении можно было целенаправленно менять цвет, подбирать цвет освещения индивидуально для лечения психических заболеваний.

12.2. АГРЕССИВНЫЕ СТРУКТУРЫ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ И СТРЕСС

Вернемся к пространственно-частотным характеристикам сцен. Изображения различных естественных сцен имеют общее свойство: в их пространственно-частотном спектре низкочастотные компоненты имеют большую амплитуду, нежели высокочастотные. Амплитуда пространственно-частотного спектра изображений таких сцен уменьшается обратно пропорционально пространственной частоте [Цуккерман, Шостацкий, 1978; Field, 1987]. Очень важно соотношение высоких и низких пространственных частот. Оно почти постоянно в спектре натуральных сцен. Нейронные механизмы, участвующие в восприятии, хорошо адаптированы к этому свойству изображений окружающих сцен. Нарушение соотношения приводит к зрительному диссонансу. Изображения некоторых архитектурных сооружений, например зданий «спальных» районов, имеют пространственно-частотные характеристики, сильно отличающиеся от таковых для естественных сцен.

Это отличие архитектуры современных городских построек от натуральных сцен отрицательно влияет на психическое здоровье жителей [Филин, 1997].

В. А. Филин обнаружил нарушения характеристик движения глаз при просмотре сооружений «вырожденного» конструктивизма, зданий «эпохи застоя», традиционных стеклянных огромных небоскребов, заполонивших весь мир однообразной поверхностью. Оригинальные решения встречаются редко; такие сооружения, как башня Бурдж Халифа в Дубае или здание аэропорта в Баку являются приятным исключением из повсеместного доминирования однородных поверхностей в архитектуре.

Наши методы во многом перекликаются с работами Д. Филда и его соавторов [Field et al., 1997; 2004] и являются развитием работ В. А. Филина в области экологии восприятия, создавшего новое направление — видеоэкологию.

На рис. 12.1 представлены изображения, долгое рассматривание которых у чувствительных людей вызывает головокружение, головную боль и даже может вызвать оптическую эпилепсию. Особую агрессивность приобретают периодические паттерны при их окраске. При просмотре

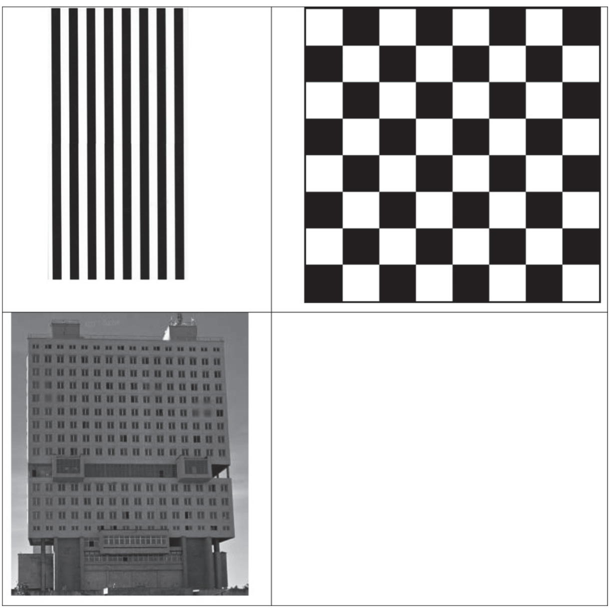


Рис. 12.1. Агрессивные периодические структуры и пример архитектурного сооружения с выраженной периодической структурой

периодических структур движения глаз переводят пространственную периодичность во временную, аналог мельканий, вызывающий сильную синхронизацию работы нейронных сетей. При просмотре гладких поверхностей необычный тип саккад вызван поиском деталей для фиксации взгляда на гладком поле, например однородной стеклянной поверхности небоскреба. Данная задача требует определенной мобилизации внимания, что и приводит к нарушению саккад и большой нагрузке на зрительный аппарат [Филин, 1997; 2002].

Агрессивные структуры применяются с целью перестройки поведения, привлечения внимания за счет синхронизации работы отдельных звеньев центральной нервной системы аналогично мелькающему свету. Эти опасные периодические структуры присутствуют всюду. Это и окрашенные поверхности, и архитектурные сооружения. Особую опасность представляют собой периодические элементы в рекламе. Они зачастую сочетают пространственную и временную периодичность (рис. 12.2).



Рис. 12.2. Агрессивные элементы на рекламных плакатах

По данным фМРТ, восприятие агрессивных структур изменяет метаболизм мозга, вызывает нежелательный тип перестройки активности нейронных сетей. Возможное объяснение механизма этих явлений основано на различии пространственно-частотных характеристик изображений природных сцен, архитектурных сооружений, стилей изобразительного искусства последнего столетия. В результате происходит рассогласование деятельности нейронных сетей, согласованных с пространственно-временными спектрами натуральных сцен.

Длительное наблюдение изображений с выраженными отклонениями их пространственно-частотного спектра от спектра натуральных сцен могут вызывать зрительный стресс и аномальное поведение человека. Выявлено повышение энергии спектральных компонент в середине пространственно-частотного диапазона — это сигнал опасности, свидетельствующий о наличии оптического, не всегда осознаваемого стрессора.

Геометрия рисунка зрительного поля имеет важнейшее когнитивное значение. Геометрия окрашенного или неокрашенного фона может быть нейтральной, но может также оказывать позитивное или негативное воздействие на человека. Изображения реальных сцен и объектов широко применяют в качестве стимулов для изучения роли формы объектов, характеристик текстур, цвета и восприятия реальных сцен в возможном воздействии на эмоциональную сферу человека. Интерес к изучению экологически безопасного восприятия видимых полей рассматривается в рамках видеоэкологии, области знания о взаимодействии человека с окружающей его видимой средой — важнейшим экологическим фактором [Филин, 1997; Логунова и др., 2012; Шелепин и др., 2017; Wilkins, 1999; 2002].

Прикладная значимость данных исследований когда-то рассматривалась в области изобразительного творчества, дизайна и даже эстетики. Однако затем она приобрела большое социальное значение в различных областях — от медицины и социологии до оборонных исследований, поскольку открывает возможности воздействия на эмоциональную сферу человека.

В настоящее время в видеоэкологии выделены два связанных фактора «загрязнения» видимой среды человека — гомогенность и агрессивность визуального пространства. Под агрессивным понимают такое визуальное пространство, которое способно при созерцании вызывать негативные эмоциональные или физиологические реакции (например, головную боль) у человека.

Гомогенность визуального пространства проявляется в отсутствии видимых неупорядоченных элементов на однородной поверхности, текстуре, либо в резком их сокращении. При гомогенности визуального пространства возникает сложность при фиксации глазом границы начала или конца одного фрагмента по отношению к другому. Исследованиями [Филин, 1997] в области видеоэкологии подчеркивается, что в гомогенной среде не может полноценно работать бинокулярный аппарат глаз (нет стимула к слиянию двух изображений правого и левого глаза, появляется несовпадение их контуров, отсутствующее в гомогенном поле), нарушаются механизмы аккомодации, нарушается регуляция размера зрачка, работа центральных нейронов глазодвигательного аппарата. Основной упор В. А. Филиным делался на то, что «в гомогенной среде не могут полноценно работать и другие механизмы зрения, в частности системы включения и выключения рецепторов (*on-* и *off-*), которые срабатывают на перепад освещенности, отсутствующий в гомогенной среде, так как и до, и после саккады взор остается в рамках однородного визуального поля». Данные выводы говорят о том, что гомогенное поле является как бы блокатором своевременного афферентного сигнала, поскольку после совершения действия (саккады) нет подтверждения этому действию, а это неизбежно ведет к неприятным ощущениям.

Агрессивность визуального пространства проявляется в множестве одинаковых элементов, расположенных преимущественно равномерно в поле зрения человека. Такое пространство называется агрессивным полем. Многоэтажный жилой дом с большим количеством окон является примером агрессивного визуального поля. Агрессивность видимого поля объясняется тем, что, во-первых, возникает сложность при определении опорной точки из-за большого количества одинаковых фрагментов и затрудняется концентрация внимания; а во-вторых, усиливается нагрузка на *on*- и *off*-системы, поскольку рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки глаза устроены так, что каждое пересечение границы «белое — черное» и «черное — белое» («окно — стена» и «стена — окно») заставляет их срабатывать. Увеличение сенсорного потока, а правильнее сказать повторяющаяся информационная атака, ведет к перегрузке зрительного канала связи, в особенности его зрительных центров. Человек при такой стимуляции вынужден повышать свои внутренние энергоресурсы, которые расходуются при минимальном получении новой информации, повышаются утомляемость, депрессивность, что, как следствие, ведет к раздражению.

Более того, агрессивные поля различаются по степени агрессивности. Наиболее агрессивными, согласно исследованиям В. А. Филина, оказались тесты «прожектор», состоящий из концентрических окружностей (83 %), и «тельняшка» (71%) — из чередующихся полос. Большой интерес вызывало изучение влияния динамических агрессивных полей на автоматию саккад. В качестве агрессивных динамических полей использовали движущиеся шахматные тесты, при этом было отмечено изменение ориентации саккад, увеличение их амплитуды и числа. Это свидетельствовало о том, что они являются более сильным зрительным раздражителем.

Метод исследования агрессивности объекта и фона построен на основе пространственно-частотного, частотно-временного спектра и цветового спектра. Созданная методика фильтрации изображений в пространственно-частотной области легко позволяет объективно выделить агрессивную визуальную среду. Современные методы описания пространственно-частотных спектров натуральных и искусственных сцен позволяют установить их зависимость от свойств агрессивных и неагрессивных изображений. Методы пространственно-частотной фильтрации изображений позволяют заранее отнести тот или иной видеосюжет к агрессивным или неагрессивным полям (см. цветную иллюстрацию 12.1).

Обработка информации о сцене, целостном объекте и его деталях, как мы уже обсуждали, передается по разным каналам зрительной системы. Особый интерес представляет анализ других неосознаваемых факторов, а именно семантических факторов стресса. Например, малозаметные изменения динамической мимики собеседника, настроение толпы. По на-

блюдениям А. Вилкинса, его испытуемые воспринимают изображение коробочки семян лотоса как крайне опасное (см. цветную иллюстрацию 12.2). Объяснения нет. Другие, близкие к гексагональным, структуры не только не вызывают ужас и панику — соты медоносной пчелы, а, наоборот, вызывают восхищение красотой гексагональной упаковки.

Мы сравнили изображение коробочки семян лотоса и папул больного (цветная иллюстрация 12.2). Ключевой явилась пространственная частота этих изображений при определенном расстоянии. В объяснении эффекта страха перед дырами (the fear of holes) мы соглашаемся с высказываниями выдающегося английского ученого и политика Т. Маколея (1800–1859), который, в частности, писал: «Чума была более смертельной, чем оспа, но она посещала наш берег только один или два раза, в то время как оспа всегда была между нами, заполняя кладбища мертвыми, измучивая постоянным страхом всех тех, кто не болел, оставляя на лицах людей, жизнь которой она пощадила, уродливые знаки, как знак ее силы». Следовательно, люди должны были остерегаться больных, для этого им надо было замечать внешние проявления оспы. Папулы представляют собой главное внешнее проявление оспы. Периодичность папулы около 1 с/град. примерно на расстоянии 1,5 м от поверхности тела. На цветной иллюстрации 12.2 паттерн папул сопоставлен с паттерном коробочки семян лотоса. На расстоянии 1,5 м от коробочки периодичность аналогична периодичности папул. На этой дистанции коробочка семян лотоса вызывает у многих людей тревогу, поскольку находиться возле больного опасно — инфекция обычно разносится по воздуху на расстоянии до 1,8 м от него.

Таким образом, существует взаимосвязь оптических факторов и семантики сцены. Их взаимодействие — это один из важнейших факторов, обеспечивающих возможность управления целенаправленной деятельностью человека. Об управлении целенаправленной деятельностью человека с помощью агрессивных стимулов известно давно: их использовали еще шаманы в ритуальных оргиях. Известны определенные пространственно-временные структуры изображений, оказывающие эмоционально положительное и эмоционально отрицательное воздействие на человека.

До недавнего времени не удавалось найти механизм, вызывающий дискомфорт и даже стресс при восприятии внешнего архитектурного образа зданий. По данным фМРТ, восприятие разных архитектурных стилей изменяет метаболизм мозга, перестройку активности нейронных сетей. Возможное объяснение механизма этих явлений основано на анализе частоты мельканий светильников для освещения улиц, помещений, рекламы, вещательного телевидения и рекламных каналов Интернета. В ряде стран законодательно запрещены мелькания с определенной частотой и яркостью вещательного телевидения. Существует служба контроля. Ничем не

ограниченные мелькания яркого света в сочетании с навязчивыми звуковыми ритмами, близкими по частотам к древним шаманским ритуалам, перестраивают сознание. Воздействие на человека по интенсивности этих «заклинаний» соизмеримо со звуками шторма, изображения периодических набегающих волн, со вспышками молний и громом над головой, но с временной частотой значительно более опасной.

Особый интерес представляет управление светом через супрахиазмальное ядро всей гормональной системы человека; это связано с определенными частотами мелькания света — от суточных ритмов изменения освещенности до неосознаваемых мельканий газоразрядных ламп и светодиодных светильников на рабочем месте, грохота и лазерных мельканий (неограниченных для возможностей глаза интенсивностей) во время массовых представлений. Совершенно иную картину дают естественные сцены в обычном, не штормовом состоянии. Амплитуда пространственно-частотного спектра изображений таких сцен уменьшается обратно пропорционально пространственной частоте [Field, 1987].

12.3. ОРНАМЕНТЫ КАК МАРКЕРЫ

Орнаменты представляют особый интерес. Во-первых, это изображения, принципиально отличающиеся от изображений натуральных сцен своей периодичностью. Во-вторых, это символы архетипа человека. Орнамент по своей структуре рисунка напоминает повторяющийся текст мантры. В качестве стимулов для изучения психофизиологических реакций разных людей нами были также использованы и маркеры архетипов. Из изобразительных средств выражения архетипических образов наиболее доступны орнаменты.

Для разработки методов изучения проявлений архетипа нами были выбраны орнаменты. Они могут носить абстрактный (символический) характер, могут включать элементы растительного мира, могут напоминать лицо человека или содержать его в качестве составной части, элементом орнамента могут служить шрифты. Орнамент всегда носил национальный и политический характер. Любой музей этнографии гордится своими коллекциями орнаментов. Они являются неизменной составляющей декора посуды, одежды и архитектуры. Однако до сих пор непонятно, используется ли определенный орнамент этническими группами, близкими по своим генетическим характеристикам, воспитанными в одной среде, проживающими на одной территории, или важна совокупность разных факторов. Вопрос об устойчивости орнамента для разных народов или же о его связи с местностью требует дальнейшего исследования.

Орнаменты служат не только источником наслаждения и самовыражения человека, группы людей, народности и нации, но и объектом политического выражения, политической борьбы. Орнаменты присутствуют на некоторых государственных символах, флагах, гербах и т. д. Они во многом являются инструментом самоидентификации народа.

Чрезвычайно важна интерпретация орнамента как средства самоидентификации, поскольку он является не только объектом культуры, но и средством политическим борьбы, информационной войны. Поэтому в качестве важнейшей группы стимулов при разработке методов исследования архетипа человека использовались орнаменты. Для этого в Институте физиологии имени И. П. Павлова РАН В. Семеновой был собран уникальный банк изображений — орнаментов практически всех народов. В результате работы ею создана коллекция, которая помимо возможности эстетического наслаждения дает возможность для серьезных научных изысканий. С помощью цифровой обработки изображений, входящих в этот банк, начат поиск закономерностей в конструкциях орнаментов. Объем этого исследования выходит далеко за пределы нашей книги.

Рассмотрим лишь два типа орнаментов, имеющих определенную форму, но не содержащих явной смысловой нагрузки, — абстрактные и растительные (рис. 12.3).

Методика описания этих предварительно отобранных орнаментов была нами построена на пространственно-частотном языке, на котором принято описывать как изображение, так и работу разных звеньев зрительной системы [Шелепин и др., 1985]. В качестве пространственно-частотной характеристики изображений использовали угол наклона амплитудного спектра изображения в логарифмической системе координат [Field, 1993]. Так как исходный спектр изображения — двумерный, перед вычислением наклона он преобразовывался в одномерный путем усреднения его сечений, ориентации которых охватывали угол 360 градусов (всего 1000 ориентаций с шагом в 0,36 градуса). Затем полученное усредненное сечение спектра методом наименьших квадратов аппроксимировалось прямой линией, далее вычислялся тангенс угла между этой линией и осью абсцисс. Значение тангенса использовали в качестве характеристики степени наклона спектра.

Известно [Field, 1993], что графики сечений амплитудных спектров большинства изображений достаточно точно описываются выражением fk, где f — пространственная частота, а коэффициент k, равный тангенсу наклона сечения спектра (в логарифмическом масштабе), для натуральных сцен приблизительно равен 1,2.

Мы сопоставили графики амплитуд пространственно-частотных спектров и аппроксимирующие их прямые для изображения естественных сцен

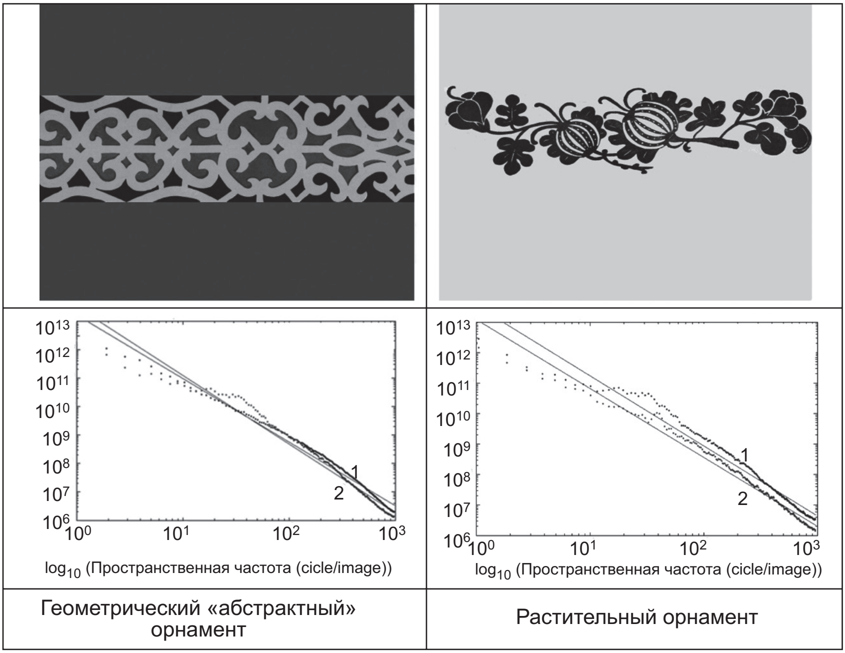


Рис. 12.3. Геометрический и растительный орнаменты. Графики амплитуд их пространственно-частотных спектров и аппроксимирующие прямые

и исследованных нами орнаментов. На рис. 12.3 показана аппроксимация прямыми усредненных спектров двух наборов изображений — естественных сцен и орнаментов. Для первого спектра тангенс наклона прямой составляет 1,23, для второго — 1,34. Из этого следует, что эти изображения относятся к разным классам. Там же показана аппроксимация усредненных спектров изображений для двух типов орнаментов. Для первого орнамента (абстрактного) спектра тангенс наклона прямой составляет 1,34, для второго — 1,32. На представленном графике обнаруживается высокий подъем в области средних пространственных частот преимущественно для первого орнамента.

Высокий подъем в области средних пространственных частот указывает на большую агрессивность этого геометрического, абстрактного орнамента. Об агрессивности периодических структур, близких к абстрактным, говорили разные исследователи [Wilkins, 1999; 2002]. Примеры агрессивных элементов представлены на рис. 12.4.

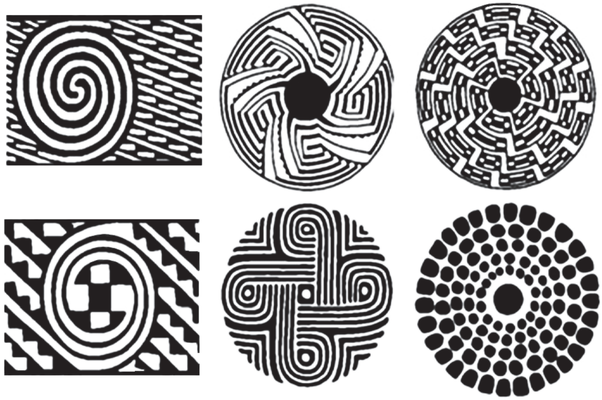


Рис. 12.4. Агрессивные элементы орнаментов

ГЛАВА 13

«ОБЪЕКТИВНЫЕ МАРКЕРЫ» ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕОСОЗНАННОГО ВОСПРИЯТИЯ

13.1. НЕОСОЗНАВАЕМЫЕ РЕАКЦИИ МОЗГА НА СЕНСОРНЫЕ СИГНАЛЫ

Любой сенсорный процесс состоит из осознаваемых и неосознаваемых составляющих. Если считать количество передаваемой в мозг информации как произведение верхней граничной частоты мельканий, заметных глазу человека (а это около 55 Гц), на число одновременно работающих волокон в зрительном нерве человека, которые примем за 880 000 (из установленного диапазона для разных людей в 800 000–1200 000 волокон) [Глезер, Блинков, 1964], то получим 45 000 000 двоичных единиц в секунду [Schober, 1956]. Сопоставив полученные данные с количеством информации, на передачу которой за единицу времени рассчитан телевизионный канал, получим удовлетворительное их соответствие. Это будет той предельной величиной информации, которая поступает в мозг и может быть использована мозгом, а может быть и не использована. Поступившая информация может быть осознанной, а может быть и неосознанной. Именно такое количество информации может поступать в мозг. Очевидно, что между разными элементами изображения могут быть разные статистические связи.

На телевизионном кадре 50-х годов прошлого века могла быть сложная жанровая сцена, а могла быть изображена одна буква или лишь черный квадрат на сером фоне. Поэтому естественно, что количество воспринимаемой человеком информации пытались исследовать доступными тогда психологическими методами, основанными на ответах испытуемых о содержании того, что они видели на экране в момент предъявления изображения в одном-двух кадрах (из известного испытуемым набора изображений объектов) [Sziklai, 1956].

Полученные таким образом значения пропускной способности зрительной системы оказываются всего лишь в диапазоне 20–50 двоичных единиц в секунду за время предъявления около 100 мс [Глезер, Цуккерман, 1961]. В этих исследованиях изображения были упрощены, испытуемым задавали вопрос только об объектах, алфавит которых был им знаком. Из этих исследований следует, что реально воспринимаемая и осознаваемая информация может быть гораздо больше или гораздо меньше расчетной. Это связано с особенностями статистики изображения натуральных сцен. Предельное количество передаваемой информации [Schober, 1956] не учитывает возможность сжатия информации при переходе от пиксельного анализа изображений к учету статистической и семантической связности элементов изображения в рецептивных полях зрительной системы. Особый интерес представляет сжатие информации за счет избирательного внимания, за счет сужения алфавита, с которым работает наблюдатель.

Эти проблемы начали обсуждать давно, еще до развития техники связи, до информационного подхода к обработке сенсорной информации. Уже в древности иллюзионисты (а иногда и просто мошенники) разработали способы отвлечения внимания, или переключения внимания от окружающего мира (способы медитации), и даже отключения сознания. Эти явления известны из повседневной жизни и из художественных произведений. Однако очень мало известно о методах извлечения информации, ее количестве, содержании, полученных неосознанным способом [Костандов, 1983; Schneider, Velmans, 2008].

В сенсорной физиологии работы по измерению неосознаваемых реакций проводили давно; на этой основе был создан метод количественной оценки деятельности органов слуха, так называемая объективная аудиометрия [Гершуни, 1947]. Затем были начаты разработки объективной визометрии, визоконтрастометрии на основе произвольно не контролируемых реакций мозга на зрительные стимулы.

Одновременно шел поиск решения ряда проблем, которые тесно связаны друг с другом. Первый вопрос: как извлечь информацию о том, что человек видел или слышал, но по разным причинам не обратил на это внимания? Из первого вопроса следует второй: если кроме осознаваемой

информации наблюдатель воспринимает и информацию неосознаваемую, то как она влияет на его поведение? Этот вопрос сразу вызывает третий: если воспринимается неосознаваемая информация, то можно ли управлять поведением человека так, чтобы он не осознавал это управление? Ответы на эти вопросы интересуют самые разные слои общества и общественные институты — от полиции, суда, медиков, инженеров, педагогов, политических деятелей, психотерапевтов, режиссеров до мошенников и откровенных разбойников.

Мы умышленно уходим от философских определений сознания. Лучше обратимся к наглядным примерам: если смотреть на люминесцентную лампу, которая при условии исправности светится равномерно, и разместить на голове электроды, то в спектре ЭЭГ мы находим сигнал 100 Гц, связанный с частотой мелькания лампы. Следовательно, наше сознание не видит 100 Гц мельканий, но зрительная система их проводит в мозг (то, что лампа мелькает, можно проверить, поместив фотодиод перед этой лампой, — мы обнаруживаем эти 100 Гц мельканий). Это означает также, что сознание «не видит» 100 Гц мельканий, а подсознание имеет эту информацию. Именно такого рода ситуации мы обсуждаем в этой книге.

Есть и более сложные ситуации: если предъявить на короткое время на экране изображение близкого для испытуемого человека и незнакомца, а затем дать помеху, то мы увидим разницу в откликах мозга по данным ЭЭГ. Именно в таком ходе рассуждений особую популярность в обществе получили исследования «двадцать пятого кадра». Термин «двадцать пятый кадр» не совсем точен. В кино эпохи 1920–1990-х годов использовали (и используют в существующих до сих пор старых кинотеатрах) частоту кадров двадцать четыре в секунду. Это общемировой стандарт. Но частота мельканий в 24 Гц заметна. Поэтому еще в 1920-е годы, вскоре после введения в кино двадцатичетырехкадрового стандарта, стали применять обтюратор, позволяющий показывать каждый кадр два раза. Таким образом частота мельканий экрана удваивается и достигает сорока восьми в секунду. Применение обтюратора стало истинной находкой, так как позволило увеличивать частоту кадров и «подгонять» ее в неосознаваемую область. Увеличение частоты кадров кино за счет увеличения скорости протяжки пленки экономически невыгодно; при больших скоростях протяжки пленки требовалась более дорогостоящая лентопротяжная аппаратура, увеличивался расход пленки из-за ее повышенной изнашиваемости, поэтому киноаппаратуру с большей частотой кадров в секунду использовали только в прикладных целях (например, для исследования взаимодействия снаряда с броней). Кстати, фотографии пули, летящей со сверхзвуковой скоростью, и фото возникновения ударной волны были сделаны Э. Махом в чрезвычайно остроумных опытах еще в XIX веке. Лентопротяжные

механизмы с частотой в двадцать пять (или в США — тридцать) кадров применяли для согласования кино с телевизионными европейскими или американскими стандартами. В конце XX века появились новые стандарты кино — IMAX и др.

В телевидении СССР и Западной Европы была использована кадровая частота 50 Гц, в Северной Америке — 60 Гц. Эти частоты были привязаны к частоте колебаний тока в сети. В телевидении при частоте 50 или 60 Гц использовались подряд два полукадра; на самом деле каждый из них — это полный кадр, но с прореженными строками (в одном случае — четные, во втором — нечетные). В кино экономили на пленке и качестве лентопротяжных механизмов, в аналоговом телевидении экономили на полосе частот. Цифровое телевидение позволило за счет сжатия перейти к высокой четкости.

Допустим, в аналоговом телевидении сорок девятый и пятидесятый полукадры задаются просто как пробелы, а на всех остальных кадрах — изображение лесов и полей. В этом случае два пустых светлых кадра будут слегка заметны, но они меняют восприятие всего сюжета. Вставка, представляющая собой всего лишь обычный светлый или темный кадр, осуществляет синхронизацию всего мозга. Поэтому во многих странах подобные вставки запрещены в вещательном телевидении.

13.2. ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ НЕОСОЗНАВАЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР

Указанные в предыдущем параграфе вставки-пробелы в ролике можно обнаружить визуально при непосредственном трудоемком покадровом просмотре, но легко выявить фотометрическими аппаратурными методами. Такие вставки можно легко заметить и по реакции на них мозга потребителя на как бы скрытую от него в ролике информацию. Эти реакции можно зафиксировать с помощью современных энцефалографов.

В ЭЭГ можно выявить не только яркостные вставки-бланки, но и семантические вставки. Современная обработка может выделить отклики мозга на кадровую частоту и 60, и даже 100 Гц. Ранее полоса пропускания энцефалографов не превышала 30 Гц, в более поздних модификациях электроэнцефалографов необходимо было ставить полосовые фильтры для подавления чувствительности в области 50 Гц для ликвидации сетевой наводки. Именно поэтому попытки, которые предпринимались

в 1950–1990-х годах, выявить с помощью энцефалограммы возможность увидеть отдельный кадр (сорок девятый и пятидесятый телевизионные полукадры) не увенчались успехом. Сигнал мозга на такой частоте невелик, а режекторный фильтр усилителя на частоте наводки, подавлял и наводку, и сигнал. Отклик мозга не проходил из-за узкополосных заграждающих фильтров.

Теперь появилась такая возможность. Были созданы специальные стимулирующие оптические системы, появились новые усилители, новые методы обработки, улучшилось отношение сигнал/шум усилителей. Сетевая наводка перестала быть неприятностью. Предъявление стимулов стало возможным на любых кадровых частотах до 200 Гц (а в специальных дисплеях даже выше). Поэтому если и остались проблемы подавления ЭЭГ в области 50 Гц, то теперь можно подавать стимулы с частотой и 40, и 60, и 80 Гц, и даже больше на специальных мониторах.

Нами был разработан метод управления контрастом, временным и пространственно-частотным диапазоном предъявляемых изображений. Было показано, что подпороговые по контрасту изображения букв, коротких слов, отдельных объектов преимущественно больших размеров наблюдатель воспринимает даже неосознанно. Получены очень важные результаты, развивающие исследования семидесятилетней давности с «двадцать пятым кадром». Впервые было показано, что косвенно по изменениям в энцефалограмме экспериментатору можно видеть отклик мозга испытуемого на невидимый испытуемым стимул [Шелепин, Хараузов, 2009].

Методика изучения восприятия подпорогового текста в ролике, например «двадцать пятого кадра», включает в себя разработанный нами алгоритм измерений и реализующий его аппаратно-программный психофизиологический испытательный стенд. Энцефалография как базовый элемент нашего аппаратно-программного комплекса позволяет регистрировать сигналы почти до 200 Гц. Ограничивающими частоту мельканий остаются дисплеи, служащие для предъявления стимулов. Обычно они имеют частоту обновления экрана не более 160 Гц. Есть специальные дисплеи с высокой частотой обновления, но они выпускаются только на заказ.

Важным элементом аппаратно-программного комплекса и алгоритма измерений является возможность управления базовыми характеристиками изображений. Для подготовки стимулов были применены разработанные в нашей лаборатории программы вейвлетной фильтрации (разработчик — С. В. Пронин). Оценку подсознательных реакций в этой главе мы рассмотрим по результатам измерения ЭЭГ.

Для исследования информации, поступающей по пространственно-низкочастотному и быстро реагирующему во времени (магноклеточному) каналу зрительной системы, необходимо создавать изображения

с большими угловыми размерами, поскольку чем ниже пространственная частота сигнала, тем больше ее период. Угловые размеры зависят от удаленности наблюдателя от дисплея. Если мы хотим создать низкочастотное для наблюдателя изображение на обычном экране, надо придвинуть лицо наблюдателя близко к экрану, в результате чего можно получить низкочастотное изображение. Однако в этом случае будет повышенная нагрузка на аккомодацию хрусталика глаза. Чтобы ее уменьшить, надо поместить плюсовую линзу из офтальмологического набора перед глазом наблюдателя. Но это слишком необычные условия наблюдения. Удобнее использовать большие экраны. Особый эффект создают большие полусферы — возникает эффект присутствия (как эффект присутствия на стереодисплеях). Этот эффект соизмерим и с восприятием пространства в IMAX информации, поступающей по низкочастотному каналу зрительной системы.

Для широкого круга исследований мы используем более дешевый вариант, который позволяет добиваться практически идентичных результатов. На цветной иллюстрации 7.1 даны изображения нашей установки. Использование таких экранов требует незначительных по трудоемкости пересчетов угловых размеров объектов в рамках курса школьной тригонометрии. Таким образом, для решения большинства практических задач удобнее иметь большой плоский экран и проекционную систему для предъявления фона и изображений объектов и сцен, управляемую ЭВМ.

В экранированной камере для испытуемого помещен экран, на котором предъявляются стимулы с большими угловыми размерами, низкими пространственными частотами. Ширина экрана равна 180 см. Испытуемый может находиться на расстоянии от экрана до 170 см, то есть до расстояния, при котором несущественно влияние аккомодации. Большой экран позволяет создавать низкочастотные изображения и сильнее влиять на эмоциональную составляющую восприятия.

Электроэнцефалография является одним из основных способов исследования различных сторон деятельности центральной нервной системы животных и человека. Электрофизиологические методы определения психофизических порогов восприятия впервые были обобщены и формализованы в работах В. А. Кожевникова [Кожевников, Мещерский, 1963]. Электроэнцефалографический метод помогает выяснить роль и значение различных образований мозга, открывает все новые и новые закономерности в его функциональной организации и деятельности, связи между различными отделами. Метод является, безусловно, незаменимым для клинической диагностики. Особое место во всей проблеме анализа биопотенциалов занимает анализ вызванных потенциалов, то есть изменений энцефалограммы, связанных с подачей внешнего сенсорного стимула.

Именно акцент на фундаментальных основах выделения сигнала из шума, алгоритмах обработки ЭЭГ, а не на конструктивных решениях 1950–1960-х годов сохраняет исследования В. А. Кожевникова актуальными и в наши дни. Разработка алгоритмов обработки электроэнцефалограмм естественным образом захватывала и общебиологические проблемы, связанные с оптимальным выделением сигнала. В. А. Кожевников и Р. М. Мещерский ввели в физиологию понятие зависимости разрешающей способности фильтра от частоты и от времени, так называемый принцип неопределенности Габора. Суть его заключается в том, что эпоха анализа и полоса пропускания фильтра связаны простой зависимостью, а именно их произведение равно константе, а необходимое для анализа время обратно пропорционально разрешающей способности анализирующей системы, то есть ширине полосы пропускаемых ею частот. Точное представление данных по шкале частот может быть достигнуто только ценой эквивалентной потери подробностей во временной картине процесса. Авторы подчеркивали, что для анализа ЭЭГ неэффективным является применение получивших в те годы основное развитие резонансных фильтров, неэффективным они считали и применение обычного гармонического анализа, хотя долгие годы именно этот подход был основным в обработке ЭЭГ. Кожевников и Мещерский предложили применение полосовых фильтров и показали, что более эффективным является применение синхронных когерентных накопителей.

Один из наиболее интересных методов — это расчет вызванной синхронизации различных ритмов текущей ЭЭГ во время стимуляции. Фурье-анализ ЭЭГ имеет ряд недостатков. Сейчас широко применимо вейвлетное преобразование текущей ЭЭГ. Это позволяет исследовать динамику независимых изменений различных ритмов ЭЭГ, возникающих в ответ на предъявление стимулов. Интерес многих исследователей привлек анализ вызванной межэпоховой когерентности, в которой каждый участок ЭЭГ, соответствующий периоду стимуляции, раскладывается на вейвлеты, далее оценивается постоянство фазы в вызванных стимуляцией изменениях ритмов ЭЭГ. Если фаза определенного ритма постоянна, это говорит о когерентности в данном частотном диапазоне. Современные усилители и вычислительная техника позволяют с высокой точностью регистрировать и анализировать вызванную синхронизацию высокочастотных ритмов ЭЭГ (30 Гц и выше). Было показано, что при распознавании человеком определенных фигур через 100 мс после предъявления стимула возникает синхронизация ЭЭГ в гамма-частотном диапазоне, значительно большая по сравнению с предъявлением бесформенных стимулов той же интенсивности. Была выдвинута гипотеза, что временное связывание сенсорных нейронов в диапазоне гамма-частоты представляет собой субъективное ощущение. Основные отличия в гамма-диапазоне (40 Гц) мы наблюдали

при предъявлении эмоционально значимых слов по сравнению с именами и псевдословами, и происходило это через 100 мс после предъявления стимула. Эти слова могли восприниматься как фигуры со знакомой статистикой или известным спектром.

Анализ психофизических тестов, в которых испытуемые должны были оценивать эмоциональную окраску нейтральных тестовых изображений лиц по методу принудительного выбора, показал, что их выбор не зависит от того, какого знака эмоция предшествовала тестовому стимулу. В обоих вариантах стимуляции, как при осознанном, так и при неосознанном предъявлении эмоциональных сигналов, предшествовавших выбору, оценка тестовых нейтральных лиц колебалась в районе 50 % (49,6 и 50,3 % соответственно).

На рис. 13.1 представлены усредненные данные вызванных потенциалов по двенадцати испытуемым от затылочной области (канал *Oz*) и центральной области (канал *Cz*). В обоих вариантах стимуляции наблюдается реакция вызванных потенциалов на предъявление стимулов.

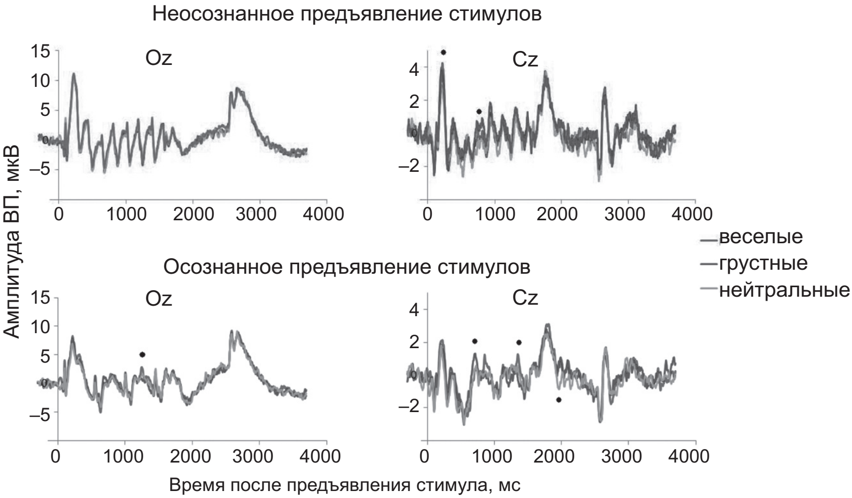


Рис. 13.1. Зрительные вызванные потенциалы в ответ на предъявление последовательностей изображений, содержащих веселые, грустные и нейтральные фотографии. Усреднение по двенадцати испытуемым

Можно отследить реакцию на появление и окончание мелькания последовательности маскировочных и неосознаваемых эмоциональных сигналов, можно видеть ответ на предъявление и осознаваемого проверочного сигнала. Однако каких-либо существенных различий во всех исследуемых

отведениях между ответами на стимулы разного эмоционального содержания не выявлено. Как видно (рис. 13.1), форма и латентный период волн вызванных потенциалов остаются практически неизменными, за исключением нескольких разнонаправленных, но статистически значимых отличий в амплитуде некоторых волн (отмечены точками). Эти отличия оказались невелики и потребовали проведения исследований в других условиях.

Деятельность оператора в задачах классификации и распознавания зависит не только от физических и семантических свойств изображений объектов, но и от внутренних мотивов, цели и данной оператору инструкции. Были установлены закономерности визуального обнаружения объектов, возможности рассчитывать вероятность и время обнаружения объекта. Эффективность поиска объекта находится в зависимости от условий наблюдения и характеристик самого объекта. При отнесении объекта к какой-либо категории наблюдатели могут либо использовать присущие данному объекту признаки, либо определять форму объекта в целом, гештальт объекта. Однако успешный поиск возможен в случае адекватной инструкции оператору, осуществляющему поиск и обнаружение объектов, в особенности в том случае, если поиск и распознавание изображений объектов необходимо осуществить среди изображений объектов, которые можно классифицировать неоднозначно, на основании их физических и семантических свойств [Моисеенко и др., 2015; 2016].

Г. Моисеенко и ее коллегами были выполнены ЭЭГ-исследования механизмов классификации, выбраны две категории изображений объектов — живой и неживой природы. Чтобы уменьшить влияние отдельных признаков, характерных для этих групп изображений объектов, была проведена предварительная обработка тестовых изображений с помощью вейвлетной фильтрации. Все тестовые изображения обеих групп живых и неживых объектов избирательно отфильтровали в области высоких и низких пространственных частот. В результате проведенной фильтрации получили четыре класса тестовых изображений: изображения объектов живой природы, отфильтрованные по низкой пространственной частоте; изображения объектов живой природы, отфильтрованные по высокой пространственной частоте; изображения объектов неживой природы, отфильтрованные по высокой пространственной частоте; изображения объектов неживой природы, отфильтрованные по низкой пространственной частоте.

Фильтрация позволила представить каждый стимул в группе: 1) «живых» высокочастотных стимулов; 2) «живых» низкочастотных стимулов; 3) «неживых» высокочастотных стимулов; 4) «неживых» низкочастотных стимулов. Отфильтрованные изображения с оставшимися низкими пространственными частотами в отличие от отфильтрованных изображений с оставшимися высокими пространственными частотами потеряли мно-

гие детали, которые могли бы служить признаками для гипотетических детекторов зрительной системы, помогающими осуществлять категоризацию, но в то же время благодаря сохраненному целостному низкочастотному описанию, они выглядели вполне узнаваемыми. И высокочастотные с двойным черно-белым контуром изображения, инвариантные к полутонам, сохранили «оболочку» структуры объекта и остались хорошо узнаваемыми. Возможность использования одних и тех же изображений из достаточно большого набора объектов, но в разном пространственно-частотном диапазоне позволяет в какой-то степени игнорировать роль отдельных физических свойств изображений и выделить их семантическое значение. Таким образом, цель исследования заключалась в сравнении временных характеристик и локализации процессов категоризации изображений объектов по физическим и семантическим характеристикам на основании регистрации вызванных когнитивных потенциалов, косвенно отражающих локализацию и временные характеристики работы нейронных сетей мозга человека, осуществляющих категоризацию по разным критериям, формы, размытия, класса «живой — неживой» объект.

Методами иконики (цифровой обработки и синтеза изображений) синтезировали сорок пять изображений объектов живой природы и сорок пять изображений объектов неживой природы; вейвлетной фильтрацией разделили весь алфавит объектов на две группы по девяносто низкочастотных и девяносто высокочастотных. Имелись четыре класса объектов, различающихся по физическим характеристикам («размытые — четкие») и по семантическим признакам («живые — неживые»). Испытуемым ставилась задача классифицировать по физическим признакам изображения всех четырех классов и аналогично по семантическим признакам также четыре класса изображений (рис. 13.2).

Далее регистрировали зрительные вызванные когнитивные потенциалы. Основные компоненты вызванных потенциалов анализировали в следующих временных интервалах начиная от момента предъявления стимула: компоненты N70 и P70 (20–80 мс), P100 и N100 (80–150 мс), P170 и N170 (150–220 мс), P250 и N250 (220–300 мс), P300 (300–450 мс), P500 (450–650 мс). Для оценки статистической значимости различий амплитуды вызванных потенциалов в выбранных временных интервалах использовали парный двухвыборочный t-тест для средних (t-критерий для зависимых) выборок. Результаты считали значимыми при $p < 0{,}05$. Электроды располагали по системе 10–20 с добавочным затылочным отведением *Oz*. Всего были проведены две серии экспериментов с одинаковыми стимулами, но с разными инструкциями наблюдателям (см. выше). Испытуемые — сорок два добровольца в возрасте от 20 до 38 лет с остротой зрения не менее 1, праворукие, без неврологических патологий.

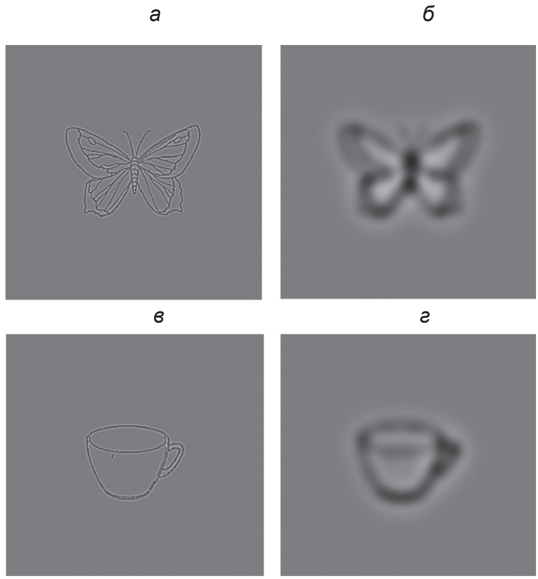


Рис. 13.2. Примеры двух категорий черно-белых изображений — объектов живой природы, отфильтрованных с помощью вейвлетного преобразования в области высоких (*а*), (*в*) и низких пространственных частот (*б*), (*г*)

Результаты первой серии исследований с задачей различения объектов по семантическим признакам. Среднее время реакции испытуемых (нажатие на кнопку) составило 661 мс, стандартное отклонение — 227 мс. Средняя вероятность правильности ответов составила 95 %, стандартное отклонение — 3 %. В результате анализа ЭЭГ, регистрируемой во время выполнения задачи, были выявлены достоверные различия в амплитуде разных компонентов вызванных потенциалов в зависимости от семантических и пространственно-частотных признаков изображений. Достоверными считали лишь те различия, которые наблюдали одновременно для двух типов изображений. Так, различающимися по семантическим признакам считали только те компоненты вызванных потенциалов, для которых были выявлены достоверные различия в ответ на предъявление стимулов, отфильтрованных в обоих пространственно-частотных диапазонах, то есть все расчеты были сделаны при выборе из ста восьмидесяти изображений. Различающимися по пространственно-частотным признакам считались только те компоненты вызванных потенциалов, которые достоверно изменялись в ответ на предъявление объектов как живой, так и неживой природы, сохранялся выбор из ста восьмидесяти изображений (рис. 13.3).

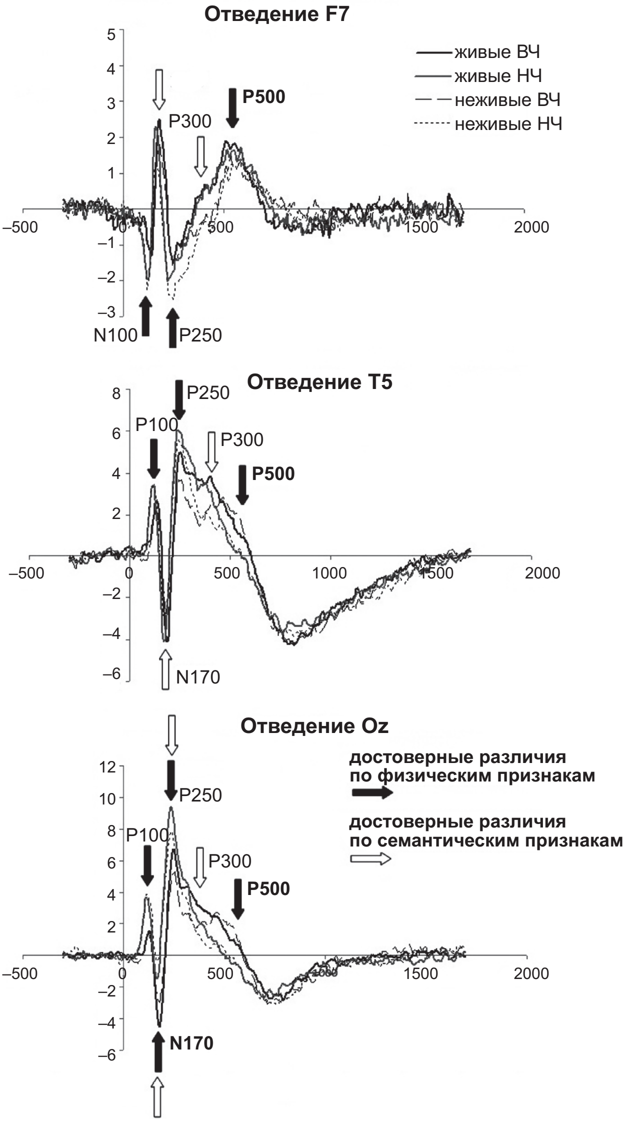


Рис. 13.3. Усредненные вызванные потенциалы во время выполнения инструкции по различению семантических признаков в изображениях: *а* — центральное отведение *Cz*; *б* — затылочное отведение *Oz*. Стрелками показаны значимые различия ($p < 0{,}05$) по семантическим и пространственно-частотным характеристикам изображений

Затем проводили статистическое сравнение значений амплитуды компонентов, полученных в ответ на предъявление различных типов стимулов. На рис. 13.4 представлены результаты сравнительного анализа амплитуды вызванных потенциалов в выбранных интервалах времени для каждого электрода. Данные рассчитаны по результатам измерений у двадцати одного испытуемого при категоризации изображений «живой — неживой».

На рис. 13.4 а отмечены электроды, при отведении вызванных потенциалов от которых наблюдали значимые изменения амплитуды в зависимости от пространственно-частотных характеристик изображений, а на рис. 13.5 б — от семантических свойств изображений. Порог статистической значимости, рассчитанный с помощью парного *t*-критерия, составлял 5 % ($p < 0,05$). Ранние компоненты P100 и N100 зависят только от пространственно-частотных характеристик изображений и не зависят от их семантического содержания. Достоверные отличия в амплитуде этих компонентов были обнаружены в затылочных, теменных, височных и лобных областях. У компонентов P170 и N170 амплитуда зависела от пространственной частоты стимула в затылочных областях и от семантических признаков в лобных, центральных и височных областях. Ампли-

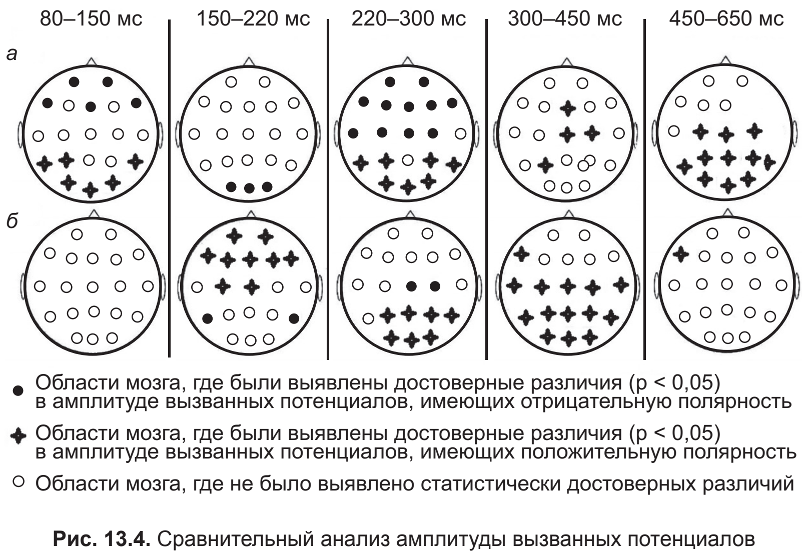


Рис. 13.4. Сравнительный анализ амплитуды вызванных потенциалов в различные интервалы времени; инструкция испытуемым — различение семантических признаков в изображениях: *а* — зависимость амплитуды от пространственной частоты изображений; *б* — зависимость амплитуды от семантических свойств изображений

туда компонентов вызванных потенциалов P250 и N250 зависела от пространственной частоты стимула практически во всех исследуемых областях, а от семантических признаков — только в теменно-затылочных отведениях. Амплитуда компонента P300 зависела от семантических признаков стимулов, в то время как более поздний компонент P500 зависел от пространственной частоты изображений. При решении задачи категоризации объектов живой и неживой природы амплитуда вызванных потенциалов была выше при предъявлении изображений объектов живой природы. При этом амплитуда всех волн (компонентов вызванных потенциалов), за исключением P500, была выше при предъявлении изображений низкой пространственной частоты. Амплитуда компонента P500, наоборот, была выше при предъявлении высокочастотных изображений.

Результаты второй серии исследований с задачей различения объектов по физическим свойствам изображений по пространственной частоте. Среднее время реакции испытуемых во второй серии исследований было около 500 мс, стандартное отклонение по выборке — 140 мс. Средняя вероятность правильных ответов составила 99 %, стандартное отклонение — 1,4%. На рис. 13.5 показаны примеры вызванных потенциалов. Представлены данные усреднения по всей группе испытуемых (двадцать один человек). Так же как и в первой серии, латентный период больше при предъявлении высокочастотных стимулов.

На рис. 13.6 представлены результаты анализа вызванных потенциалов, зарегистрированных у двадцати одного испытуемого при категоризации изображений как «четкий — размытый»). Так же как в серии категоризации по семантическим свойствам изображений, самые ранние компоненты вызванных потенциалов P100 и N100 зависели только от пространственной частоты стимулов. Компоненты P170 и N170 зависели как от пространственно-частотных, так и от семантических свойств изображений. Объекты неживой природы вызывали увеличение амплитуды по сравнению с объектами живой природы в вызванных потенциалах, регистрируемых в затылочных и теменных отведениях. Амплитуда всех компонентов в затылочных и теменных отведениях была выше в ответ на предъявление низкочастотных изображений, а в лобных отведениях — ниже. В лобных отведениях, кроме того, амплитуда компонентов была больше в ответ на предъявление изображений живой природы. Более поздние волны, например P300, зависели от пространственно-частотных свойств изображений. Амплитуда компонента P300 была выше на низкочастотные изображения в затылочных, височных и теменных отведениях. Таким образом, аналогично первому эксперименту наблюдалась тенденция к увеличению амплитуды вызванных потенциалов в ответ на предъявление низкочастотных изображений объектов живой природы. Вероятно, не удалось полно-

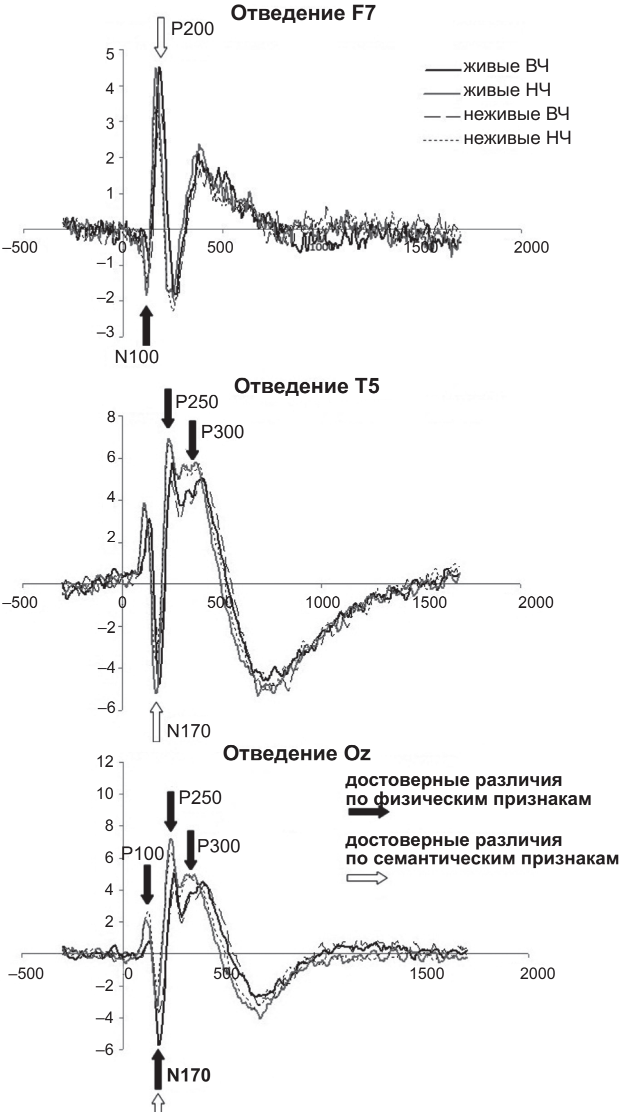
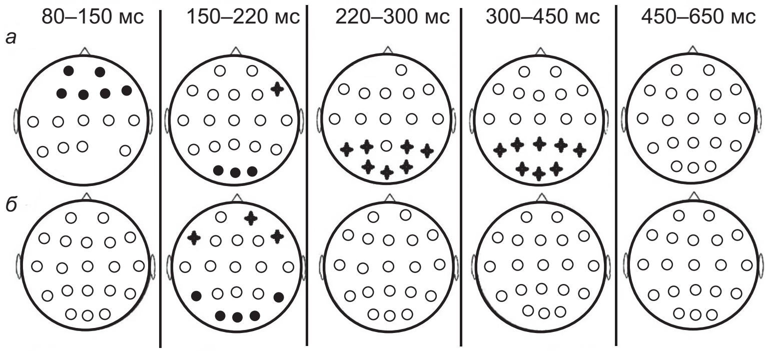


Рис. 13.5. Усредненные вызванные потенциалы во время выполнения инструкции по различению пространственно-частотных свойств изображений: *а* — центральное отведение *Cz*; *б* — затылочное отведение *Oz*. Стрелками показаны достоверные различия (p < 0,05) по семантическим и по пространственно-частотным характеристикам изображений



● Области мозга, где были выявлены достоверные различия (p < 0,05) в амплитуде вызванных потенциалов, имеющих отрицательную полярность

✚ Области мозга, где были выявлены достоверные различия (p < 0,05) в амплитуде вызванных потенциалов, имеющих положительную полярность

○ Области мозга, где не было выявлено статистически достоверных различий

Рис. 13.6. Сравнительный анализ амплитуды вызванных потенциалов в различные интервалы времени; инструкция испытуемым — различение пространственно-частотных свойств изображений: *а* — зависимость амплитуды от пространственной частоты изображений; *б* — зависимость амплитуды от семантических свойств изображений

стью уравнять изображения после фильтрации в высокочастотном и низкочастотном диапазонах.

Анализ латентных периодов основных волн вызванных потенциалов показал, что относительно ранние компоненты зависят от пространственной частоты стимула, в то время как более поздние волны зависят от инструкции, которую получил наблюдатель. Различия в семантическом содержании изображений не влияли на латентные периоды вызванных потенциалов. Латентный период ранних волн вызванных потенциалов (до 300 мс) был меньше при предъявлении стимулов, отфильтрованных по низкой пространственной частоте, по сравнению с предъявлением высокочастотных изображений. Этот эффект в той или иной степени наблюдали во всех отведениях. Так, в затылочном отведении Oz латентный период негативной волны N170 в ответ на предъявление стимулов низкой пространственной частоты составлял в среднем по всем испытуемым 166 ± 13 мс. При предъявлении стимулов высокой пространственной частоты эта волна имела латентный период 175 ± 16 мс. Относительно высокие разбросы значений латентного периода обусловлены межиндивидуальными различиями. Однако увеличение латентного периода в ответ на предъявление стимулов высокой пространственной частоты мы наблюдали у 90 % испытуемых. Поэтому, несмотря на то что различие невели-

ко и составило всего 9 мс, оно было статистически достоверно ($p < 0,05$, парный критерий Вилкоксона). В центральном отведении *Cz* в том же временном интервале наблюдали волну положительной полярности, латентный период которой также увеличивался при предъявлении высокочастотных изображений (170 ± 17 мс в ответ на низкочастотные стимулы и 186 ± 15 мс в ответ на предъявление высокочастотных стимулов). Увеличение латентного периода составило 16 мс с достоверностью $p < 0,05$ (парный критерий Вилкоксона).

Обнаруженная зависимость латентных периодов вызванного потенциала от пространственной частоты стимула подтверждает многочисленные литературные данные о том, что стимулы низкой пространственной частоты, передаваемые по крупноклеточному пути в зрительной системе, обрабатываются быстрее, чем изображения высокой пространственной частоты, передаваемые по мелкоклеточному пути. Сравнивая вызванные потенциалы, регистрируемые при выполнении обеих инструкций, можно наблюдать увеличение латентного периода поздней волны P500 в задачах категоризации стимулов по семантическому признаку по сравнению с задачей категоризации по физическим характеристикам изображений. Латентный период этой волны, усредненный по всем испытуемым, в первом эксперименте (в задаче различения «живой — неживой») составил 522 ± 66 мс; у испытуемых во втором эксперименте (задача различения «четкий — размытый») он составил 431 ± 70 мс. Обнаруженное различие 91 мс достоверно (*t*-критерий, $p < 0,05$).

Следует отметить, что P500 — единственная волна, латентный период которой зависел от инструкции. Направление изменения латентного периода совпадает с направлением изменений времени реакции при смене инструкции. Так, в задачах категоризации по семантическим признакам время реакции было в среднем на 160 мс больше, чем в задачах категоризации по физическим характеристикам. Увеличение времени реакции при наблюдении одних и тех стимулов говорит об увеличении сложности задачи. Действительно, различение изображений по семантическому признаку — более сложная задача, так как в данном случае дополнительно задействована зрительная память. Увеличение латентного периода волны P500 при этой инструкции предполагает, что она отражает процессы принятия решений и подготовки моторного ответа.

В первой задаче, когда надо было различать изображения по семантике, отличия по физическим пространственно-частотным свойствам объектов мы наблюдали при отведении от сорока семи компонентов, а по семантике от тридцати четырех компонентов, вызванных суммарно в разные выбранные нами моменты времени, от всех электродов. Если давали инструкцию определять основную пространственную частоту, то по тридца-

ти одному компоненту можно было установить различие потенциалов на стимулы, содержащие разный диапазон пространственных частот, и всего лишь по девяти компонентам в разные моменты времени вызванные потенциалы отличались в разных классах по семантике, хотя этого задания не было и мозг делал это автоматически.

Важно отметить, что различие по классам изображений не имеет ничего общего с различием на значимый и незначимый стимулы. Можно утверждать, что в исследованиях, проведенных Моисеенко с соавторами, у испытуемых мозг осуществлял классификацию «живой — неживой» неосознанно. Классификацию осуществлял экспериментатор по данным вызванных потенциалов. Испытуемый осуществлял другую задачу; хотя он осознавал, какие объекты он видит, но классификацию не проводил. Так же как в первой серии исследований, когда испытуемый проводил классификацию «живой — неживой», экспериментатор мог видеть различия в ответах на низкочастотный и высокочастотный сигналы. И в этих опытах испытуемой мог осознанно различать четкость предъявляемых картинок.

Известно, что на ранних этапах обработки происходит сначала анализ на низких пространственных частотах, а затем на высоких. Иными словами, сначала проводится глобальный анализ в пространственно-низкочастотном диапазоне, а затем уже локальный — в высокочастотном диапазоне. Вызванные потенциалы дают возможность исследовать достаточно точно временную последовательность обработки информации и приблизительную пространственную локализацию процессов обработки по долям мозга. Особое значение в этих исследованиях имеют подбор стимулов, их синтез или предварительная цифровая обработка и описание. Именно этот путь является основным в наших исследованиях вообще и вызванных потенциалов в частности. В исследованиях по изучению локального и глобального механизмов обработки на кортикальном уровне были получены значимые ($p < 0{,}05$) отличия между двумя разными категориями ответов (в основном в затылочной области). Различные оценочные действия одного и того же стимула могут по-разному активировать затылочную кору. Исходя из полученных нами данных можно также предположить, что сначала происходит анализ изображений по пространственно-частотным признакам, затем категоризация и принятие решения. Ранее при исследовании влияния инструкции на категоризацию лиц людей по выраженности лицевой экспрессии было показано, что зрительная обработка чувствительна к взаимодействию инструкции, полученной наблюдателем, и информации о стимуле во временном интервале до 200 мс [Joyce et al., 2006].

На основании полученных данных можно утверждать, что в обоих экспериментах происходит параллельная, как правило, неосознаваемая обра-

ботка изображений по тем признакам, которые остаются вне области внимания. Например, в задачах категоризации изображений по их физическим свойствам семантическая составляющая остается за пределами внимания испытуемых — им важнее было определить, размытое или нет изображение, а что именно в нем содержалось, порой испытуемые не могли вспомнить. Тем не менее в вызванных потенциалах мы наблюдали зависимость амплитуды, в том числе и от семантической составляющей изображения. Такой же эффект мы наблюдали в эксперименте с привлечением внимания к семантике стимула — амплитуда вызванных потенциалов зависела не только от семантики, но и от пространственной частоты стимула.

В исследованиях вызванных потенциалов А. М. Иваницкого была высказана идея о том, что субъективные феномены восприятия возникают в результате повторного входа возбуждения в места первичных проекций и сопоставления на этой основе новой информации с прошлым опытом [Иваницкий, 1976]. Сравнивая в одном и том же исследовании амплитуду волн вызванных потенциалов с интенсивностью и временем ощущений, он предположил, что ощущение возникает в результате возврата возбуждения в проекционную кору после прохождения через «ассоциативную» кору, гиппокамп и мотивационные подкорковые центры. Благодаря этому на нейронах проекционной коры происходит синтез сенсорной информации и сведений, извлекаемых из памяти.

В задаче категоризации объектов вне зависимости от инструкции: при данных методах обработки, чувствительности и отношении сигнал/шум энцефалографов мы не почти не видим очень ранние потенциалы коры. Если судить по компонентам с латентностью 100 мс, кажется, что почти одновременно активируются затылочные и лобные области, височные и теменные области. Поздняя волна в лобных и в центральных областях отражает работу «компаратора» входного сигнала и работу нейронных сетей, осуществляющих принятие решения, перед запуском двигательных программ ответа оператора. Классификация тестовых сигналов в нейронных сетях согласована с выбором и последующим нажатием кнопки пульта в соответствии с получаемой оператором инструкцией.

В результате проведенных исследований работы операторов при различных инструкциях (различать объекты по их семантическим характеристикам и различать объекты по их физическим признакам) было установлено разное соотношение амплитуды и фазы основных компонентов когнитивных вызванных потенциалов в отдельных отведениях на стимулы, имеющие разное семантическое значение и разные оптические характеристики (пространственно-частотный спектр). Электрофизиологические методы являются эффективным методом оценки операторской деятельности, позволяя косвенно установить последовательность и осо-

знанность обработки информации оптических характеристик и семантического значения наблюдаемого изображения. Различие между двумя исследованиями состоит в том, что во втором эксперименте по сравнению с первым латентный период волны P500 уменьшается на 91 мс и время реакции испытуемых сокращается до 160 мс. P500 — единственная волна, латентный период которой зависел от инструкции и которая связана с процессами принятия решения. Показательным также является активация нижневисочных и лобных областей в интервале 170 мс на семантические характеристики изображений в обоих экспериментах вне зависимости от инструкции. Также было установлено, что процесс категоризации изображений по физическим свойствам изображений менее подвержен влиянию инструкции, чем категоризация изображений по семантическим признакам изображений.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что от начала подачи стимуляции до организации моторного ответа происходит параллельная обработка наблюдаемого сигнала по разным пространственно-частотным характеристикам и по разным семантическим признакам. Почти одинаковое время проявления отклика в очень удаленных отведениях позволяет предположить удивительную синхронизацию нейронных сетей в разных долях мозга. Однако обратная полярность этого отклика указывает на то, что, вероятно, мы имеем дело с регистрацией ответов одной нейронной сети, образующей диполь. Именно с этой сетью могут быть синхронизированы разные области. Подобное распределение очень выгодно, так как единая активирующая сеть позволяет перераспределять ресурсы. Следовательно, по характеристикам вызванных потенциалов можно косвенно судить о состоянии нейронных сетей, управляя характеристиками изображений, и перераспределять активацию этих сетей.

Так, с помощью изменения задачи, поставленной перед наблюдателем (инструкции), удалось идентифицировать параметры компонентов когнитивных вызванных потенциалов, отражающие оптические и семантические свойства изображений. Получаемая наблюдателем инструкция достоверно изменяет активность нейронной сети, что мы и видим по различиям амплитуд основных компонентов вызванных потенциалов. Выбранная нами методика пространственной фильтрации изображений позволила первоначально разделить изображения на высоко- и низкочастотные составляющие, получить такой же разделенный ответ в мозге и выделить в височных и лобных областях отклик на семантическое значение стимула при инструкции классифицировать объекты по их физическим свойствам. Следовательно, неосознаваемая классификация «живой — неживой» происходит помимо задачи, которую осознанно выполняет оператор.

13.3. СЕРДЕЧНЫЙ РИТМ КАК ИНДИКАТОР РЕАКЦИЙ ЧЕЛОВЕКА НА НЕОСОЗНАННЫЕ И ОСОЗНАННЫЕ СИГНАЛЫ

Базисным методом оценки влияния как осознанного, так и неосознанного воздействия с незапамятных времен является сердечный ритм. В китайской и тибетской медицине пульс, как и в Европе, измеряли вручную, но умели различать до тысячи разновидностей реакций.

Современные исследования механизмов сердцебиений начинаются с работы Клода Бернара, выявившего два оппонентных управляющих нерва, ускоряющих и замедляющих сердечный ритм. Особое внимание уделяется колебаниям пульса, показана взаимосвязь колебаний пульса и дыхания, рассматриваются временное и частотное представление колебаний частоты сердечных сокращений, физические и физиологические основы спектрального анализа сердечного ритма, влияние некоторых рефлексов и лекарственных препаратов на показатели вариабельности сердечного ритма. Сердечный ритм здорового человека нестабилен. Вариабельность сердечного ритма видна при спектральном анализе кардиоинтервалов, при котором выявляется и количественно оценивается скрытная динамика изменений ритма. Спектральный анализ позволяет выделить основные частоты, динамику их изменений, отражающих стрессорную реакцию испытуемого на это воздействие. Относительно высокочастотные колебания сердечного ритма (HF) в диапазоне от 0,4 до 0,15 Гц обусловлены дыханием. Более низкочастотные колебания отражают активность подкоркового сосудистого центра. В результате спектрального анализа динамического ряда кардиоинтервалов получают ряд показателей, по которым оценивают вегетативный баланс, состояние систем управления сердечным ритмом и функциональное состояние всего организма [Баевский, 2002; Heart Rate Variability,1986]. Для расчета индекса стресса измеряют мощность спектра низкочастотной (LF) и высокочастотной (HF) составляющих кардиоинтервалов. Затем вычисляют отношение мощностей низкочастотной и высокочастотной составляющих LF/HF, по которому судят о состоянии операторов [Баевский, 2002; Heart Rate Variability, 1986].

Мы сопоставили результаты исследования оценки эмоционального состояния испытуемого при свободном рассматривании сложных изображений (содержащих как положительные, так и отрицательные фрагменты) по разработанному нами методу и по традиционным методам оценки психофизиологического состояния, таким как электрокардиограмма. Регистрация электрокардиограммы была проведена с помощью кардиопере-

датчика финской фирмы Polar в виде пояса, который крепится на грудь испытуемых. Сигнал от кардиопередатчика мы улавливали специальной антенной, закрепленной за спиной испытуемых. Антенна была подключена к микрофонному входу регистрирующего компьютера, на котором проводились запись и анализ вариабельности сердечного ритма.

В качестве стимулов был использован набор цветных фотографий одного или нескольких человек, выражающих различные эмоции, которые условно можно разделить на две группы — веселые и грустные.

В предварительном исследовании приняли участие всего два человека; они должны были три минуты смотреть на фотографии одного типа (предъявляемые в режиме слайд-шоу), затем, после короткого отдыха, еще три минуты смотреть на фотографии второго типа. Индекс стресса, рассчитанный на основе кардиоинтервалов у одного испытуемого, представлен на рис. 13.7: это данные третьей минуты просмотра, так как две минуты были необходимы программе обработки для накопления данных. Как видно из рисунка, индекс стресса незначительно варьирует от длительности просмотра, на него не оказывает влияния эмоциональное содержание фотографий.



Рис. 13.7. Индекс стресса, рассчитанный на основе анализа вариабельности сердечного ритма у одного испытуемого во время просмотра фотографий различной эмоциональной окраски

Отметим, что мы фиксировали эмоциональные реакции на эти же фотографии на ЭМГ. Сравнительный анализ показал, что метод вариабельности сердечного ритма оказался менее чувствительным к сдвигу эмоционального состояния при просмотре изображений, для него необходимы более сильные эмоциональные раздражители.

13.4. НЕПРОИЗВОЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИАМЕТРА ЗРАЧКА

Существует графический метод динамической регистрации и записи зрачковых реакций на свет — пупиллография, который позволяет также измерять изменения на перемены падающего на зрачок света во времени. Известно, что из сетчатки пути, регулирующие диаметр зрачка, следуют через зрительный нерв через хиазму. Зрачок — важная окуломоторная система, на которую воздействует разнообразный набор стимулов, включая изменения яркости сетчатки, внезапные изменения движения стимула, эмоциональные и когнитивные факторы, интоксикации, в том числе наркотические [Ghodse et al., 1995], и ряд заболеваний — от психических до гастроэнтерологических (например, асимметрия зрачков бывает после холецистэктомии).

В последние годы большое внимание уделено изменению зрачка при аутизме [Krach et al., 2015; Nuske et al., 2014; Blaser et al., 2014]. При аутизме появляются ненормальные социальные оценки при восприятии радостных лиц [Sepeta et al., 2012].

Анализ изменений размера зрачка в проведенных в нашей лаборатории исследованиях не выявил различий между предъявлением последовательностей, содержащих разные эмоциональные стимулы. Размер зрачка отслеживает лишь изменения яркости монитора. Вначале зрачок резко сужается, так как на черном фоне начинают мелькать изображения, затем слегка расширяется, когда опять на экране появляется черный фон. Однако кривые, соответствующие ответам на разные эмоции, практически совпадают как в случае неосознанного, так и в случае осознанного предъявления (рис. 13.8).

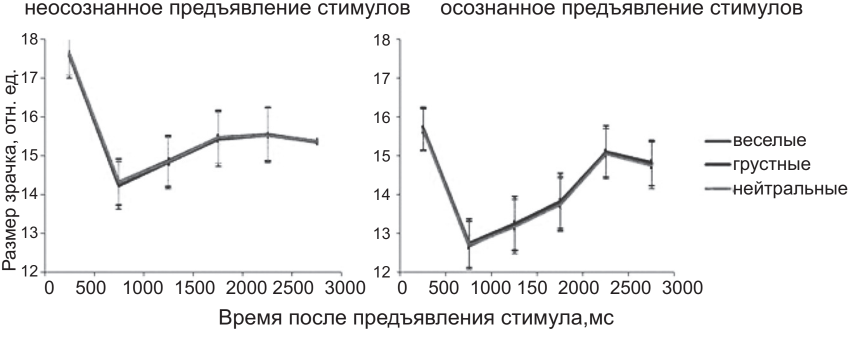


Рис. 13.8. Изменение размера зрачка в ответ на предъявление последовательностей изображений, содержащих веселые, грустные и нейтральные фотографии. Усреднение по двенадцати испытуемым

При решении же многих практических задач необходима возможность немедленной оценки качества восприятия полученной информации водителем, пилотом, военнослужащим, оператором АЭС и т. д. Мониторинг требуется мгновенный и постоянный. Как его создать? Для решения столь нетривиальной задачи многие авторы надеются на метод измерения диаметра зрачка. Метод иногда срабатывает, иногда нет. Отсутствие различий в нашем случае объясняется слабой выраженностью эмоциональной реакции на картинки. Ведь хорошо известно, что зрачок расширяется тогда, когда человек напуган. Но для анализа состояния человека при просмотре изображений и текстов, как контроль его реакции, это лишь дополнительный метод.

13.5. ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ КАК МАРКЕР НЕОСОЗНАВАЕМЫХ РЕАКЦИЙ

Широкую известность получили работы В. А. Барабанщикова, Л. Н. Гассовского, В. А. Филина, А. Л. Ярбуса и других по изучению движения глаз. Особый интерес представляют работы по исследованию микродвижений глаз [Гассовский, Никольская, 1941; Privitera et al., 2014].

Для определения неосознанных реакций удобно проводить исследование непроизвольных движений глаз. Согласно нашим экспериментальным данным, можно достаточно надежно с помощью электрофизиологических измерений активации мимических мышц узнать скрытые эмоциональные реакции испытуемого при восприятии любых изображений сцен, лиц и текста.

Поэтому начнем анализ наиболее интересного метода контроля микродвижений глаз. Известно, что при фиксации взора резко уменьшается количество саккад. Остаются только микросаккады, изученные еще в конце 1930-х годов в Государственном оптическом институте Л. Н. Гассовским и Н. А. Никольской. Они установили, что колебания взора при фиксации составляют в среднем либо ± 12 угл. мин., ± 5 угл. мин. Это две зоны нечувствительности, обусловленные размерами рецептивных полей и размером фовеолы: ± 12 угл. мин. — это в диаметре 24 угл. мин. — размер фовеолы [Гассовский, Никольская, 1941].

Если проанализировать скорость микросаккады в последовательности повторных фиксаций взора, сделанных в ходе визуального поиска, можно обнаружить два важных компонента. Один связан с визуальным контентом области фиксации. Так как фиксации по целям вызывают больше микросаккад, они создаются для тех целей, в которых труднее преодолеть неоднозначность. Другой компонент связан не со зрительным процессом, а с процессом принятия решений — финалом зрительного восприятия. Фиксации

взора, сопровождающиеся нажатием кнопки, генерировали больше микросаккад, чем фиксации на той же цели, но без необходимости нажатия кнопки. Расширение зрачка при тех же повторных фиксациях взора показывает подобную же модуляцию. Полученные данные свидетельствуют о том, что общие механизмы активации являются частью процессов восприятия, определяющих фиксационные движения глаз. Таким образом, существует выраженное влияние оптических свойств текста на работу осознанных и неосознанных каналов зрительной системы человека.

Можно определить когнитивную и эмоциональную значимость каждого слова в тексте по измерению характеристик микродвижений глаз на значимые тексты. Нами была разработана методика регистрации обнаружения ошибок в тексте или значимых для испытуемого слов в тексте на основе измерения микродвижений. Измерения микродвижений глаз, микротремор возникают при очередной фиксации глаза после саккады в момент захвата букв в тексте (это именно микротремор, изученный Л. Н. Гассовским и Н. А. Никольской в других условиях наблюдения; они открыли это явление при изучении непрерывной фиксации точки). Количество захватываемых букв в момент каждой фиксации колеблется от трех до девяти; это зависит от текста, размеров фовеолярной области и состояния испытуемого [Ламминпия и др., 2016]. В настоящее время создан алгоритм на основе измерения характеристик саккад и микросаккад глаз в процессе чтения, что позволяет установить зависимость от статистических характеристик текста, определить не только значимые для читателя участки текста, замеченные ошибки, но и выявить уровень понимания читателем всего текста (более подробно см. гл. 11).

ГЛАВА 14

ПОРЯДОК И ХАОС

14.1. ПОСТРОЕНИЕ ОБРАЗОВ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ХАОСА

Воронцовский дворец в Алупке окружен парком, участок котрого заполнен нагромождением камней после древних землетрясений. По желанию владельцев, задумавших великолепный парк, этот участок был оставлен нетронутым и назван «Хаос». Эта прихоть понятна, так как случайные структуры стимулируют нашу память и извлекают из нее самые разные образы. Иногда случайные скопления образуют устойчивые формы, напоминающие человеку о том или ином знакомом ему образе. В Крыму по дороге к Алуште есть скала «Профиль Великой Екатерины», в Коктебеле — «Мечтающий Пушкин». Случайные статичные каменные порождения чаще всего отождествляются с лицами. На севере острова Сардиния возле селения Кастельсардо есть гробница из нескольких камер, вырубленных в скале, датируемая III тысячелетием до нашей эры. Такого типа гробницы распространены на Сардинии, их называют Domus de Janas, что по-русски означает «дом ведьм». Но эта скала получила еще и собственное название; поскольку издали она напоминает слона, ее так и называют во всех путеводителях — «Слон-скала». При другом ракурсе и при определенном освещении в этой скале автор увидел лицо человека (рис. 14.1).

Не только статичный «хаос» за счет случайного скопления элементов может образовывать структуры, напоминающие знакомые формы, но и динамические случайные структуры; например, облака создают не менее



Рис. 14.1. «Слон-скала», вызывающая при изменении ракурса образ либо лица, либо слона

яркие впечатления. Эффект, вызываемый случайными структурами тех или иных образов, породил множество так называемых проективных тестов. К сожалению, применение квазиупорядоченных за счет симметрии структур, набор вопросов, служащих праймингом и для испытуемого, и для экспериментатора, и подсказки для заключений «экспериментатора» (как в методике Роршаха), — все это порождает сомнения в результатах их применения. Современные версии проективных тестов основаны на объективных (физиологических) методах регистрации реакций мозга на порождение у испытуемых вызванных случайными структурами конкретных образов.

14.2. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрим условия вызова ассоциаций изображениями текстур с заданными статистическими характеристиками. Интерес к управлению ха-

рактеристиками стимулирующих изображений является закономерным; именно в этом кроется успех дальнейших работ. Самые примитивные методы управления можно проводить с помощью прайминга.

Еще Фергюс Кемпбелл интересовался возможностью увидеть лицо в шуме. Оказалось, что в белом шуме (рис. 14.2, слева) испытуемые могут увидеть лицо. Изображенный на рис. 14.2 справа овал на том же шумовом поле работает как прайминг-подсказка. Он резко меняет восприятие всего изображения. Лицо становится заметным, где бы овал даже слишком удлиненного лица ни присутствовал. Но такой прием понятен, так как задается просто овал лица. Интереснее, чем овал, оказывает влияние на распознвание изображения лица в шуме пространственно-частотная фильтрация этого изображения.

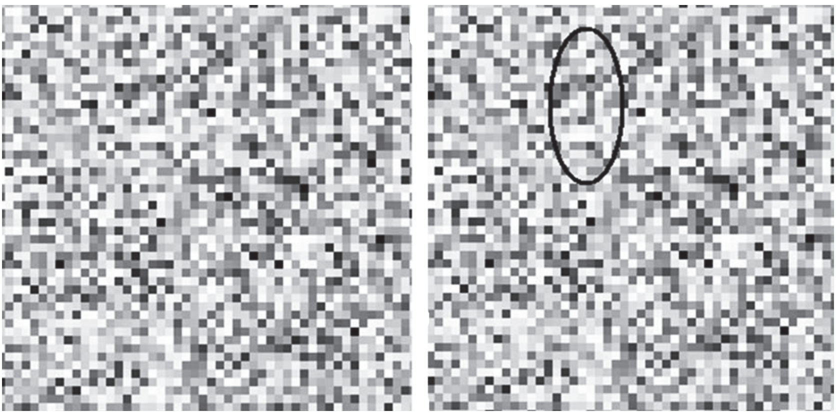


Рис. 14.2. Слева — квазибелый шум, в котором испытуемому предлагают увидеть лицо. Каждый испытуемый видит лицо в своем скоплении черно-серых пикселей. Справа — эта же реализация шума, но с нанесенным на нее овалом, служащим подсказкой, праймингом. Все испытуемые мгновенно видят в данном месте изображения в овале лицо человека — глаза, нос и губы

Рассмотрим влияние пространственных частот стимулов с высокой мерой неопределенности на процесс принятия решения. В данной главе представим исследование влияния высоких и низких пространственных частот шумов на принятие решения о наличии тестового объекта. В качестве стимулов использовали квазибелый шум. Выбор шума обусловлен тем, что данный стимул обладает максимальной мерой неопределенности (энтропией). Согласно теории информации по К. Шеннону, структуры, характеризующиеся высокой энтропией, обладают высокой информационной емкостью. Соответственно чем выше уровень неопределенности,

тем больше информации содержится в стимуле. Следовательно, в белом шуме теоретически можно увидеть что угодно. Вероятность вызванного образа зависит от многих факторов — значимости образа для испытуемого, встречаемости этих образов в быту, на производстве, в рекламе, в средствах массовой информации.

В 1960-е годы, еще будучи студентом, автор «синтезировал» квазислучайные стимулы с помощью жесткой кисти (16–22, щетина), краски и ватмана. Стоя на столе, ударом кистью с краской получал довольно неплохое рассеяние клякс на расстоянии 2000 мм на листе бумаги размером А0 (841 × 1189 мм), расстеленном на полу. Из листа А0 нарезал листы размером А3 (297 × 420 мм) с кляксами. Изображения клякс на листе предъявлял испытуемым. По стандартной шестибалльной шкале оценивал выраженность вызванного эффекта: пять — очень выражен, восторженная работа с тестом; четыре — хорошо; три — весьма удовлетворительно; два — есть эффект; единица — очень слабый эффект; ноль — нет эффекта, отрицательное отношение к обследованию. Здоровые испытуемые, а также больные шизофренией в удовлетворительном состоянии обычно видели в рассеянных кляксах «космические» сюжеты при средних значениях выраженности эффекта. Ухудшение состояния человека вызывало отрицание. Они отрицали даже наличие самих клякс. «Космические» сюжеты отмечались в ответах большинства испытуемых, как здоровых, так и больных, и, вероятно, отражали общий интерес к космической тематике тех лет (не исключена роль большого внимания к научным достижениям, чему уделялось много внимания в прессе). Рассеянные кляксы напоминали изображения звездного неба в картинах художников тех лет. Разработанный нами в 1960-е годы метод отличался от теста Роршаха в принципе. Для Роршаха важна тематика вызванных образов, вероятно, выбранных случайно. В нашей методике главное то, что не тематика вызванных образов была основой диагностики (так как вероятность появления «космических» сюжетов на эти тесты была характерна и для здоровых, и для больных), а выраженность эффекта и отношение к тестированию.

Благодаря новым технологиям синтеза изображений, количественной оценке самого изображения статистическими и пространственно-частотными методами, объективной оценке вызванного эффекта у испытуемых мы разработали более современную версию этого метода.

Добровольцам-испытуемым (двенадцать мужчин и восемь женщин в возрасте 18–27 лет) была дана следующая инструкция: определить, присутствует ли тестовый объект — «лицо» — в шуме или отсутствует. Выбор обусловлен тем, что, вероятно, механизм распознавания лица («штрихкод») задан частично на генетическом уровне. Важно подчеркнуть, что в действитель-

ности изображения шумов не содержали изображения лиц — это были «пустые» с точки зрения семантики стимулы.

Методами цифровой обработки проведена фильтрация изображения квазибелого шума в области высоких и низких пространственных частот с помощью программы фильтрации DOGF, разработанной на базе Института физиологии имени И. П. Павлова РАН (С. В. Прониным). Применены следующие уровни фильтров: для высокочастотных изображений — 10 цикл/град.; для низкочастотных — 1 цикл/град. Всего синтезировано четырнадцать разных стимулов (семь высокочастотных и семь низкочастотных). Примеры стимулов приведены на рис. 14.3.

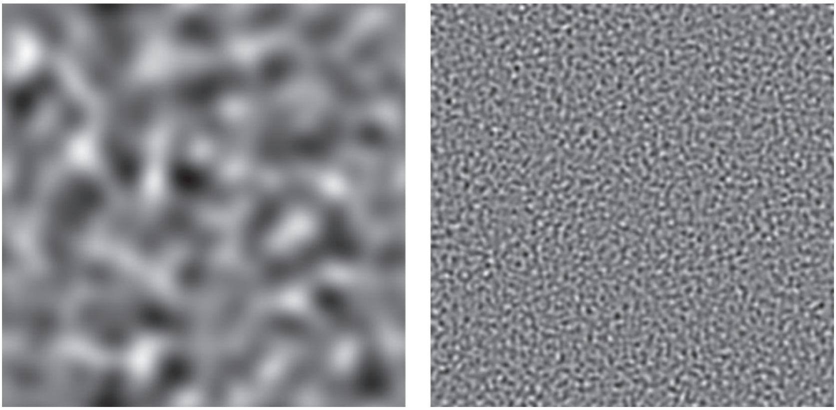


Рис. 14.3. Примеры стимулов:
а — высокочастотный шум (10 цикл/град.);
б — низкочастотный шум (1 цикл/град.)

Длительность предъявления каждого стимула — 1 сек. Использовали точку фиксации длительностью 2 сек. после каждого предъявления стимула. Добровольцам сообщалось, что им будут предъявлены изображения, в некоторых из которых спрятаны изображения лиц; эти лица могут быть с разным углом поворота, мимическим выражением, а также разными по размеру. Добровольцам предлагалось правильно определить, есть ли на изображении лицо человека. Результаты оценки вероятности наличия лица в шуме представлены на рис. 14.4. Видно, что большинство наблюдателей (74,97 %) при рассматривании шумов, отфильтрованных в области высоких пространственных частот, приняли решение о том, что в изображениях лицо отсутствует. В условиях же низкочастотной фильтрации примерно половина всех наблюдателей (52,53 %), наоборот, четко распознала лицо человека.

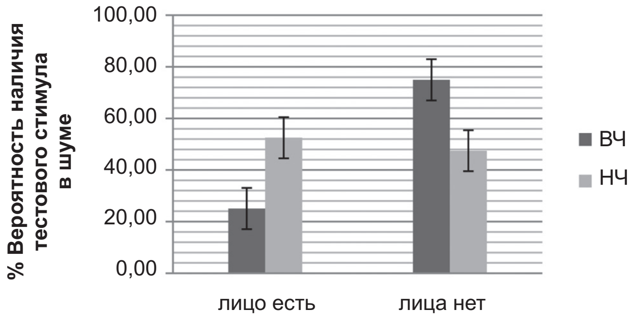


Рис. 14.4. Зависимость восприятия лица от уровня фильтрации шума: ВЧ — высокочастотная фильтрация; НЧ — низкочастотная фильтрация шума (с указанием планок погрешностей со стандартной ошибкой среднего)

Важно подчеркнуть, что в сумме в условиях «лицо есть» и «лица нет» проценты равны ста. Это сугубо зависимые аналитические величины. Поэтому достаточно анализировать только данные одного из этих условий, поскольку данные по второму условию в точности совпадут с результатами первого. Частотное распределение вероятности наличия лица существенным образом отличается в зависимости от типа фильтрации шума.

Критерий парных выборок (Paired Samples Test) и *t*-критерия Вилкоксона (Wilcoxon paired test) для зависимых переменных показал, что различия между двумя группами («ВЧ_есть лицо» и «НЧ_есть лицо») статистически достоверно отличаются на высоком уровне значимости: $p = 0{,}003$ и $p = 0{,}004$ соответственно.

Цель данной серии исследований — оценить роль полосы пространственных частот, которые использует зрительная система в условиях вызова кажущегося лица в хаосе. Руководящая модель, которая принята нами для понимания основных процессов, происходящих в мозгу при приеме и распознавании внешних сигналов изображений, — это модель согласованной фильтрации, предложенная и успешно развитая в России Н. Н. Красильниковым, а в США — Таннером и Светсом еще в 50-е годы XX века [Красильников, 1958; 1986; Tanner, Swets, 1954; Swets, Tanner, Birdsall, 1961]. В соответствии с моделью сначала происходит первичная фильтрация, затем идет согласованная фильтрация (соотнесение наблюдаемого изображения с хранящимся в памяти нейронной сети) и, наконец, происходит принятие решения.

За последние десятилетия модель претерпела значительные изменения. Известно, что первичная фильтрация осуществляется в многочисленных последовательных и параллельных фильтрах. Избирательное внимание может управлять активностью различных фильтров.

В нашем случае к полосовой пространственно-частотной фильтрации подключается фильтрация согласованная, и решение принимается при достижении порога сравнения шаблона и тестового сигнала. Испытуемым требовалось сделать выбор между пустым изображением и изображением, содержащим тестовый объект — лицо человека. В процессе принятия решения возможны ошибки. Они, как правило, имеют экологически и эволюционно обусловленный смысл. В процессе жизни множество лиц запоминается, так как нейронные сети, согласованные фильтры обучаемы. Операцию сравнения наблюдаемого и хранящегося в памяти лица выполняют обширные нейронные структуры. Выделяется инвариантное лицо, лицо вообще и лицо конкретного человека в определенные периоды его жизни. Лучше запоминаются фотографии лица, так как мимика в них фиксирована. Именно поэтому изображения (шаблоны) известных людей, портреты которых распространены, довольно жестко закреплены в памяти человека. Они сохранены сильнее, чем сохранено в памяти лицо близкого человека. Таким образом, именно наличие согласованного фильтра, выделяющего лицо, позволяет нам в хаотических случайных структурах, например в шумах, видеть иллюзорное изображение лица. По сути, происходит проекция образов из памяти человека на структуру, содержащую высокую меру неопределенности. При этом фильтрация шума в области высоких и низких пространственных частот по-разному влияет на вероятность распознавания иллюзорного объекта.

Так, при высокочастотном шуме был активирован парвоцеллюлярный путь, передающий высококонтрастную информацию. Благодаря этому каналу осуществляется локальный анализ изображения, который определяет возможность распознавания объекта. В данных условиях более 70 % добровольцев уверенно указали на отсутствие изображения лица в стимулах. А вероятность наличия изображения лица соответственно составила не более 30 %. Размытая структура низкочастотного шума, предъявляемая в нашем исследовании, активирует низкочастотный канал обработки зрительной информации, что увеличивает вероятность нахождения тестового объекта в стимуле до 50 %. Эта цифра указывает на сомнения наблюдателя. Благодаря низкочастотному каналу осуществляется глобальный анализ изображения, который предполагает меньшую точность, но более высокую и быструю готовность увидеть в различных неопределенных структурах лицо врага или друга. Данное явление имеет важное экологическое значение, так как при плохой видимости в ситуациях, когда возможна встреча с врагом, «ложная тревога» намного предпочтительнее, чем позднее распознавание реальной опасности.

В данном исследовании были рассмотрены особенности принятия решения в условиях неопределенности. Показано, что фильтрация шума

в области высоких и низких пространственных частот по-разному влияет на вероятность распознавание тестового стимула. При восприятии низкочастотного шума вероятность распознавания несуществующего изображения лица в присутствующем низкочастотном шуме выше, чем при восприятии высокочастотных шумов. Влияние личностных качеств человека на возникновение такого принятия решения существенно. Мы предлагаем новый проективный тест вместо существующих проективных тестов типа Роршаха. Исследователь может выявить осознаваемые и неосознаваемые ответы испытуемого объективными методами, рассмотренными в предыдущих главах. Особенность предлагаемых методов состоит в том, что даются неопределенные стимулы, а ответы измеряют объективными методами (см. гл. 7–12).

14.3. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ, ИМИТИРУЮЩЕЙ РАБОТУ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Были проведены исследования распознавания объектов в условиях маскировки. Моделирование нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих распознавание в этих условиях, показало, что первые слои искусственных сверточных нейронных сетей глубокого обучения представляют собой подобия фильтров Габора, идентичных рецептивным полям первичной коры зрительной системы человека. Искусственные первичные фильтры формируются в процессе длительного обучения. Живые фильтры — рецептивные поля — закладываются в большой степени на генетическом уровне. Искусственные нейронные сети не обладают важнейшим свойством инвариантности к масштабу и повороту. Для преодоления недостатков распознавания в условиях неопределенности С. В. Прониным предложен интерфейс между оптическим пространством естественной среды и современными сверточными нейронными сетями глубокого обучения по аппроксимации изображения с помощью словаря примитивов (рис. 14.5).

Е. Малаховой и О. Жуковой было проведено моделирование распознавания мимики в условиях неопределенности с помощью нейронной сети глубокого обучения на суперсервере, собранном Е. Ю. Шелепиным и

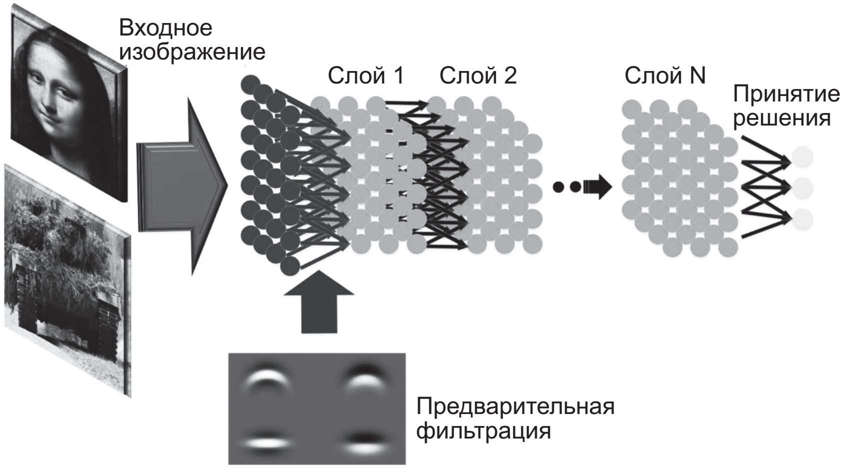


Рис. 14.5. Принятие решения в условиях неопределенности модифицированной нейронной сетью глубокого обучения, имитирующей работу зрительной системы человека при распознавании минимальных деформаций лица и объектов маскировки [Малахова и др., 2016; 2017; 2018].

К. Ю. Шелепиным в лаборатории физиологии зрения Института физиологии имени И. П. Павлова РАН. Предварительно модель научили распознавать выражение более миллиона лиц разных людей. Затем работоспособность созданной модели проверяли на известных портретах. Оказалось, что вероятность распознавания неопределенной улыбки Джоконды и для модели неопределенна и происходит с вероятностью 69,23 %, что немного превышает уровень случайного гадания.

Затем эти исследователи опробовали работоспособность модели на синтезированных лицах оптоклонов. И эта проверка показала ее высокую работоспособность. Оказалось, что вероятность распознавания улыбки пропорциональна количеству измененных пикселей изображения.

«Принятие решения моделью» о наличии лица происходит там, где его нет: в белом шуме, в полосовом низкочастотном или в высокочастотном шуме. Решение модели о наличии лица в изображениях, не содержащих лица, похоже на реакцию человека. Модель, как и человек, в шуме «видела» лицо. Но есть принципиальное отличие, которое состоит в том, что люди «видят» лицо в изображении низкочастотного шума с большей вероятностью, чем в высокочастотном изображении шума, а для модели вероятность «увидеть» лицо в низкочастотном шуме и в шуме высокочастотном пока практически одинакова и обусловлена особенностями входного

интерфейса искусственной нейронной сети. Это означает, что первичные каскады зрительной системы в результате естественного отбора начали придавать разное значение в различных ситуациях информации, поступающей в мозг по низкочастотному и по высокочастотному каналам.

Исследование механизмов распознавания мимики в системе межличностной коммуникации является важнейшей фундаментальной проблемой когнитивных наук. В нашем исследовании акцент сделан на особенностях процесса распознавания в условиях неопределенности. На семантическом уровне примером неопределенности может служить паттерн слабых мимических проявлений эмоций. Уже несколько веков улыбка Джоконды Леонардо да Винчи служит ярким примером мимических деформаций лица, выраженных на пороге восприятия. На физическом уровне пороги восприятия ограничиваются разрешением системы и внутренним шумом и могут быть измерены путем добавления помехи как эквивалентного внешнего шума. Изучение свойств неопределенности при принятии решения, вызванное восприятием объекта в условиях помехи различной степени интенсивности, наложенной на изображение, имеет как теоретические, так и прикладные аспекты. Решение этой задачи актуально для развития современных систем искусственного интеллекта, в частности сверточных нейронных сетей, обучаемых распознаванию лиц. Данное направление находится на стадии активного развития, и конвергенция методов искусственного интеллекта с психофизическими и нейротехнологическими подходами к исследованию может привнести двусторонний вклад в понимание процессов, происходящих в искусственных и биологических нейросетях.

Е. Малахова и О. Жукова решили сравнить возможности искусственных нейронных сетей и зрительной системы человека в распознавании мимики в пороговых условиях наблюдения.

В психофизической серии приняло участие двадцать девять испытуемых: тринадцать мужчин и шестнадцать женщин в возрасте 22–29 лет (средний возраст мужчин 26,1 ± 1,2 года, средний возраст женщин 24,9 ± 1,9, средний возраст по группе 25,4 ± 1,7). Для оценки порогов восприятия мимических выражений лиц использовали традиционные психофизические методы измерения порогов. Применили методику непрерывного 3D-морфинга лица на базе программного обеспечения FaceGen (Singular Inversions, Canada), которая зарекомендовала себя как надежный инструмент синтеза с большим набором инструментов для моделирования различных мимических выражений. Синтезировали два оппонентных вида эмоции (радость и грусть). Использовали шкалу FaceGen для морфинга различных градаций выраженности признака эмоции, где 10 — максимальная степень выраженности мимики и поворота, а 0 — отсутствие признака. На каждое изображение была наложена аддитивная некоррели-

рованная помеха, амплитудой 30 %, 50 и 70 % от средней яркости изображений. Дополнительно испытуемых просили оценить мимику реальных людей на фотографиях и объектах мировой живописи, например изображение Джоконды (Леонардо да Винчи).

Для реализации процесса распознавания эмоций при помощи искусственных нейронных сетей была выбрана сверточная архитектура, имеющая функциональные сходства с вентральным зрительным путем. В качестве базовой модели использовалась глубокая нейронная сеть VGG Face [Parkhi et al., 2015], обученная задаче распознавания знаменитостей на датасете из 2,6 миллионов изображений, собранных в Интернете. Данная сеть была выбрана из-за предполагаемой релевантности признаков, выделяемых при идентификации лиц для задачи распознавания мимических экспрессий.

Архитектура обучаемой нейронной сети состоит из тринадцати сверточных и трех полносвязных слоев. Сверточные слои обрабатывают изображение фильтрами небольшого размера [Malakhova, Shelepin, 2016]. Каждый фильтр кодирует какой-либо графический признак в виде матрицы; например, если говорить о первом слое, это может быть наличие наклонной линии под определенным углом, цветового градиента и т. д. Суть операции свертки заключается в умножении изображения на фильтр (ядро) свертки. Так как размер фильтра существенно меньше размера изображения, он применяется последовательно с небольшим шагом ко всему изображению, а результат суммируется и записывается в аналогичную позицию выходного изображения. Таким образом формируется карта активации, которая отражает соответствие данного изображения фильтру. Фильтры первого сверточного слоя выделяют простые признаки вроде цвета и наклона линии — они универсальны практически для всех сетей, работающих с изображениями, независимо от выполняемой задачи. Изображения, вызывающие максимальную активацию в нейронах данного слоя, представляют собой фрагменты небольшого размера, содержащие линии, углы, решетки и т. д. Фильтры второго слоя не выглядят столь же легко интерпретируемыми; размер рецептивного поля увеличивается, и изображения, подобранные для визуализации максимальной активации, содержат менее тривиальные формы. Нейроны последующих сверточных слоев охватывают все большую часть изображения и реагируют на все более сложные формы объектов, вплоть до выделения различных категорий объектов. Тем не менее в указанных слоях сохраняется зависимость реакции нейрона от пространственного расположения признака. И только в полносвязных слоях сети достигается инвариантное — независимое от положения и размера — распознавание образов. Каждый нейрон полносвязного слоя получает информацию от всех нейронов предыдущего слоя, что позволяет учитывать все возможные пространственные локации объ-

ектов. Для некоторых нейронов возможно определить признаки/объекты, выделяемые ими на изображениях, для других же это сделать довольно затруднительно. Последний из полносвязных слоев содержит количество нейронов, равное количеству классов в исходной задаче классификации, то есть в случае задачи распознавания мимики лица на изображении этот слой состоял из двух нейронов: один, представляющий категорию «улыбка», и другой, представляющий категорию «отсутствие улыбки».

Было проведено переобучение нейронной сети на специализированном датасете меньшего размера, включающем в себя художественные и реальные изображения лиц с разной градацией выраженности мимики. Обучающий датасет состоял из двух классов по пятьсот стимулов в каждом. В первую группу вошли изображения лиц людей с мимикой радости. Во вторую группу — с мимикой грусти или нейтральным выражением лица. В процессе обучения сети данные были разбиты на две группы: тренировочное множество, которое использовалось для переобучения сети, и тестовое, необходимое для контроля качества обучения. В качестве дополнительной контрольной выборки методом экспертной оценки были дополнительно отобраны изображения мировой живописи, например изображение Джоконды (Леонардо да Винчи), а также фотографии деятелей культуры.

В психофизической серии исследования были установлены пороги распознавания мимических выражений; зависимость порогов от градации выраженности признака и уровня аддитивной помехи. Показано, что пороги распознавания испытуемыми «мимики радости» и «мимики грусти» в тестовых изображениях различны при использовании программы FaceGen. При добавлении к тестовым изображениям аддитивной некоррелированной помехи амплитудой 30 % и выше от средней яркости изображений наблюдается значимое снижение показателей правильных ответов при распознавании эмоционального выражения лица. Результаты, полученные на изображениях синтезированных людей, соответствовали результатам распознавания на изображениях реальных людей [Жукова и др., 2016].

Результаты стадии исследования с моделированием искусственных нейронных сетей показали, что программа успешно справляется с распознаванием ярко выраженной мимики. Так, точность классификации на тестовом множестве составила 98 %. В условиях неопределенности, скрытой или едва намечаемой улыбки, вероятность распознавания падает до уровня случайного угадывания — 50 % (есть улыбка или ее нет). Вероятность наличия улыбки на изображении Джоконды составляет 69,23 %, что немного превышает уровень случайного гадания в сторону положительного ответа. Таким образом, выявлено, что в системах машинного зрения восприятие неопределенной мимики затруднено, так же как и у челове-

ка. Возможно, создание и обучение сети на большом наборе данных увеличило точность алгоритма, однако разметка подобного набора стимулов является отдельным вопросом, так как отсутствует однозначная принадлежность изображения к одному из классов. По мнению исследователей, для дальнейшего улучшения машинного распознавания может быть применен метод шкалирования выраженности эмоций, а не бинарная классификация [Жукова и др., 2017; Малахова и др., 2017].

14.4. ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЗМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О ПОРЯДКЕ И ХАОСЕ

Методы обработки нейрофизиологических данных как изображений активности целостного мозга, так называемые методы нейроиконики (neuroimaging), позволили выделять структуры головного мозга, активированные в результате «избирательного» воздействия. В данном параграфе рассмотрим пространственно-временную локализацию областей мозга, участвующих в принятии решения о форме текстур.

Установлено, что время реакции испытуемого коррелирует со степенью упорядоченности текстур и с латентностью поздних компонентов вызванных потенциалов во фронтальной коре. Тем самым определено время принятия решений человеком в задаче распознавания заданного класса текстур. Картирование мозга методом функциональной магнитно-резонансной томографии показало, что активность мозга в процессе принятия решений при распознавании происходит во фронтальной коре головного мозга человека [Хараузов, 2008; Шелепин и др., 2005; 2009; 2011; Harauzov, 2006, 2016; Shelepin, 2006].

Первичная и согласованная фильтрации обеспечиваются нейронами с рецептивными полями, согласованными в процессе эволюции со структурами, типичными для натуральных сцен. Для имитации статистических и пространственно-частотных свойств натуральных сцен интерес представляют стимулы, сконструированные из элементов Габора как оптимального сигнала для исследования информационных каналов [Kovacs et al., 1993; Field et al., 1993; Филд, 1999; Field et al., 1993]. Поэтому и наши тестовые матрицы были построены из элементов. Матрицы содержали упорядоченные элементы Габора среди случайно ориентированных элементов. Эта упорядоченность была статистической для всей матрицы, а не представляла обязательно квазиколлинеарные геометрические фигуры или змееобразные изображения (рис. 14.6).

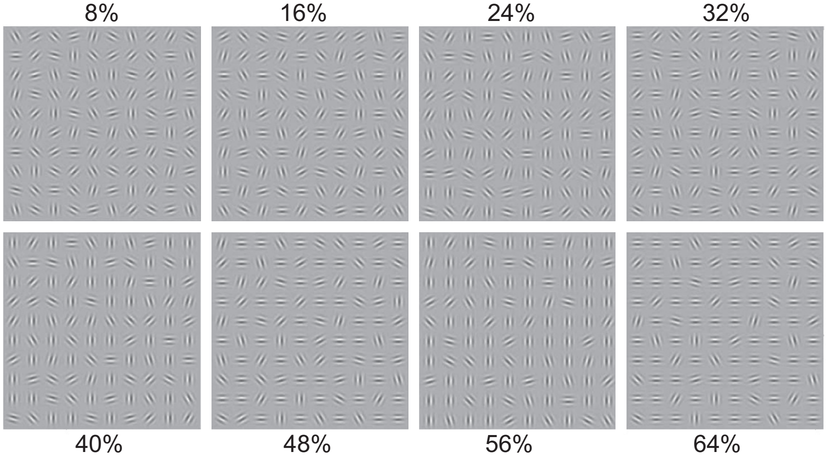


Рис. 14.6. Примеры тестовых матриц с различным содержанием одинаково ориентированных элементов Габора, представляющих различную степень упорядоченности

Мы применяли психофизические, электрофизиологические методы исследования и фМРТ (см. последний параграф данной главы). Томографию использовали для локализации областей мозга, ответственных за принятие решения о доминирующей ориентации элементов в матрице. Анализ вызванных потенциалов использовали для измерения временных характеристик этого механизма. Цель наших исследований заключалась в том, чтобы установить, где в коре головного мозга расположены центры принятия решения о форме изображения, как они взаимодействуют и когда они срабатывают после включения стимула.

В исследовании участвовали восемьдесят два здоровых испытуемых в возрасте 18–25 лет, с нормальным бинокулярным и цветовым зрением, с остротой зрения 1,0 или выше, не имеющие текущих или прошлых неврологических и психических заболеваний. Среди них шестьдесят шесть испытуемых участвовали в электрофизиологических исследованиях.

Психофизические исследования были выполнены только в условиях активного наблюдения. Испытуемый получал инструкцию нажимать левую клавишу консоли, если предъявляемая матрица, по его мнению, была с доминирующей вертикальной ориентацией, или правую — если с горизонтальной. Психофизические исследования позволили получить отношения между степенью упорядоченности стимулов, числом правильных ответов и временем реакции наблюдателя. Эти исследования описаны нами, на рис. 14.7 показаны результаты психофизических измерений, усредненные

по двадцати пяти испытуемым. Видно, что процент правильных ответов был низким для менее ориентированных матриц и резко увеличивался с увеличением степени упорядоченности ориентации, достигая плато, когда матрицы содержали сорок или более одинаково ориентированных элементов. Что касается времени реакции, то оно постепенно уменьшалось от 625 до 524 мс с увеличением числа одинаково ориентированных решеток, демонстрируя уменьшение времени обработки стимулов для более упорядоченных матриц.

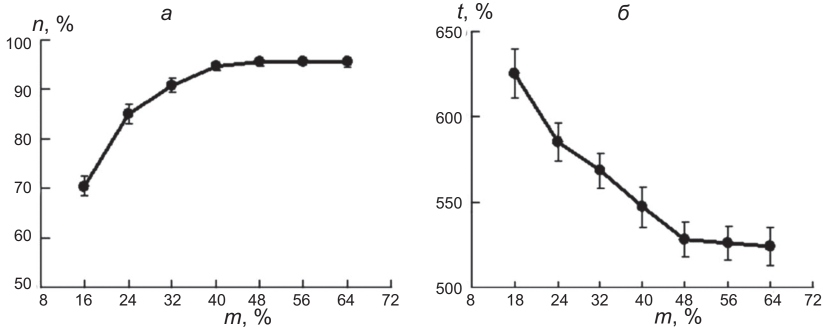


Рис. 14.7. Зависимость числа (*n*) правильных ответов (*а*) и времени реакции (*б*) от степени упорядоченности матриц (числа элементов Габора (*m*) с одной ориентацией в матрице 10 × 10 элементов Габора). Задача испытуемого — определить доминирующую ориентацию в изображении. Данные усреднены по двадцати пяти испытуемым. Вертикальные линии показывают стандартные ошибки

В электрофизиологическом исследовании мы регистрировали вызванные потенциалы от электродов, расположенных на скальпе в проекциях затылочной, теменной, височной и лобной коры. Использовали две экспериментальные процедуры: пассивное наблюдение и активный выбор (рис. 14.8).

Для пассивной задачи происходит затухание вызванных потенциалов на протяжении 300 мс после стимуляции в затылочных областях и до 400 мс — во фронтальных. Временной предел затухания в 300–400 мс для вызванных осцилляций является типичным при условии пассивного наблюдения. Более поздние колебания электрической активности мозга отсутствуют, вероятно, из-за их низкой синхронизации в этом режиме наблюдения.

При активном выборе мы наблюдаем колебания, длящиеся до 1000 мс после стимуляции. В задаче активного выбора ранние компоненты вызванных потенциалов (во временном отрезке 100–200 мс после стимуляции) не отличаются существенно для различных типов стимула. Только

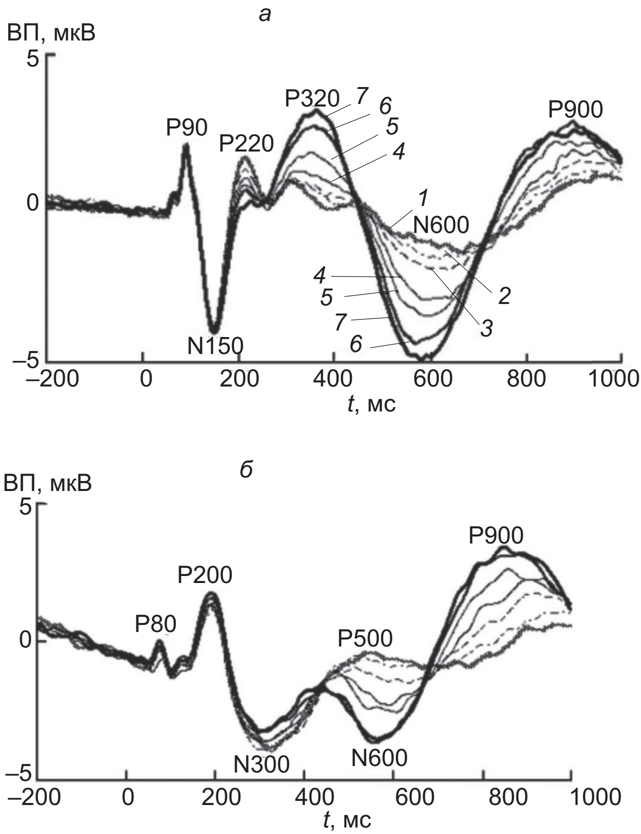


Рис. 14.8. Вызванные потенциалы, записанные в затылочной (*а*) и лобной (*б*) областях в ответ на предъявление матриц с различной степенью упорядоченности: 1–16%, 2–24, 3–32, 4–40, 5–48, 6–56, 7–64%. Активное наблюдение. Задача испытуемого заключалась в определении доминантной ориентации. Данные усреднены по двадцати пяти наблюдателям

относительно поздние компоненты показали значимую зависимость от степени упорядоченности матрицы. Эти различия в амплитуде и латентности начинаются от 200 мс после стимуляции. Во временном диапазоне 0–250 мс после стимуляции ранние волны вызванных потенциалов, записанных от затылочной и фронтальной областей, отличаются по амплитуде и латентности, но без видимых изменений полярности. Во временном отрезке примерно 250–500 мс после стимуляции вызванные потенциалы имеют разную полярность компонентов. В интервале от 500 до 1000 мс

после стимуляции поздние потенциалы фронтальной и затылочной коры одинаковым образом зависят от степени упорядоченности стимула [Шелепин и др., 2011].

Отклики от лобной доли мозга зарегистрированы центральными электродами, расположенными над центральной бороздой, и активированной в этих исследованиях по нашими данным фМРТ зоной мозга BA6.

На основе измерений латентности пиков электрофизиологических реакций и психофизических измерений времени реакции мы попытались в наших экспериментальных условиях найти их корреляцию с моментом принятия решения. Латентные периоды ранних компонентов вызванных потенциалов, записанных во фронтальной областях, не показали никакой зависимости от степени упорядоченности матриц. Первую слабо выраженную зависимость латентного периода от сложности стимула мы наблюдали во фронтальной области через 300–330 мс после стимуляции (N300). Несколько более поздняя волна (310–360 мс) продемонстрировала обратную корреляцию в затылочной коре. Выраженная зависимость значений латентности пиков вызванных потенциалов мы наблюдали во фронтальной области на 450–550 мс после стимуляции (P500). После этого вызванные потенциалы характеризуются низкочастотными отрицательными и положительными волнами (N600 и P900) с высокой амплитудой и широким распределением по скальпу. Зависимость их латентности и латентности N300 и P500 во фронтальной области наблюдалась параллельно с кривой времени реакции. В соответствии с изменением времени реакции испытуемого меняются и латентности поздних компонентов вызванных потенциалов. Вероятно, изображения более упорядоченных по ориентации элементов матрицы требуют меньше времени для обработки в зрительной системе. Зависимости латентных периодов компонентов вызванных потенциалов в затылочной и лобной коре от сложности матриц — процента упорядоченных (с одной ориентацией) элементов Габора — представлены на рис. 14.9.

Из рисунка видно, что ранние компоненты не изменяются при изменении сложности (уменьшении степени упорядоченности) стимула, а поздние — зависят от этого, как зависит и время реакции наблюдателя. Были вычислены коэффициенты корреляции между различными компонентами вызванных потенциалов затылочной и лобной областей коры и временем реакции наблюдателя (временем нажатия кнопки). Значима корреляция латентности поздних (300–900 мс) компонентов вызванных потенциалов, записанных в лобной и в затылочной областях, со временем реакции испытуемых.

Во фронтальной области (по данным фМРТ), предположительно в зоне BA6 и в поясной извилине, развивается отклик во время и уже после реакции испытуемого, после нажатия им кнопки пульта ответов [Шелепин и др., 2011].

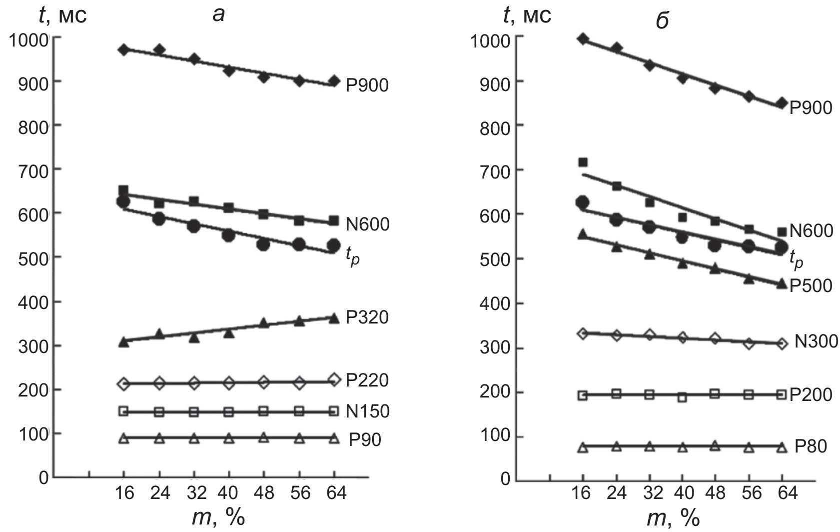


Рис. 14.9. Зависимость латентности компонентов вызванных потенциалов (P80-P900, N150-N600), полученных в затылочной и лобной областях от степени упорядоченности стимулов в задаче выделения доминантной ориентации на изображении. Электрические реакции мозга зарегистрированы от электродов, расположенных в затылочной (*а*) и лобной (*б*) областях; *tp* — время реакции испытуемого

14.5. ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ ТЕКСТУР НА ПОРОГИ РАСПОЗНАВАНИЯ

Исследование временной активности различных звеньев нейронной сети при распознавании сложных изображений претерпевает ряд последовательных преобразований. Для решения поставленных вопросов применяют электрофизиологические методы и психофизические измерения, в которых регистрируются вызванные потенциалы, время реакции и ответы испытуемого. Недостатком исключительно психофизических методов является невозможность определения пространственно-временных характеристик механизмов мозга, осуществляющих распознавание изобра-

жений, поскольку ответ испытуемого, моторная реакция оказываются самым последним этапом, который следует после принятия решения. Интерес представляет временная последовательность вовлечения в процесс распознавания различных звеньев обработки сенсорного сигнала [Иваницкий и др., 1984; Kosinski, 2006; VanRullen, Thorpe. 2001]. Адекватным подходом к решению данных задач является регистрация зрительных вызванных потенциалов в ответ на предъявление изображений в задачах распознавания. Отдельные волны вызванных потенциалов косвенно отражают вовлечение различных нейронных механизмов в зрительной системе в процесс обработки и распознавания, время активации различных звеньев зрительной системы в задачах распознавания.

В предыдущих главах представлены проведенные исследования зрительных вызванных потенциалов матриц из решеток Габора различной ориентации [Field et al., 1993–2004]. Данный набор состоит из матриц с разной ориентационной упорядоченностью. Особенность матриц в том, что они формируют динамические упорядоченные структуры, а основные физические характеристики изображения, такие как общая площадь, число фрагментов, яркость, контраст, оставались неизменными, что важно для электрофизиологических измерений [Хараузов и др., 2007]. Перед наблюдателем ставили задачу определения доминирующей ориентации в стимуле. Также при помощи объединения электрофизиологических методов и фМРТ были получены данные о локализации во времени и пространстве мозга человека центров принятия решения при распознавании матриц различной сложности [Шелепин и др., 2009; 2011].

Время принятия решения по латентным периодам компонентов зрительных вызванных потенциалов сопоставляли со временем двигательной реакции на стимулы различной сложности. Рассмотрим другой подход, основанный на анализе зависимости ответов испытуемых и характеристик зрительных вызванных потенциалов от времени предъявления стимула. Цель исследования заключалась в следующем: измерить временные пороги распознавания данного класса изображений в зависимости от времени предъявления матриц и оценить минимальное время предъявления стимула, при котором наблюдаются отличия в характеристиках зрительных вызванных потенциалов в зависимости от сложности стимула [Сельченкова и др., 2009; 2011]. При совпадении временных порогов распознавания и возникновения отличий можно предполагать, что регистрируемые параметры отражают активность нейронных процессов, осуществляющих правильное распознавание доминирующей ориентации в изображении. Высокое временное разрешение электрофизиологических методов позволяет оценить момент распознавания и принятия решения в зависимости от упорядоченности изображения, отличия порядка от хаоса.

В работе участвовали двадцать здоровых наблюдателей 18–37 лет с остротой зрения 1,0 и выше. Измерения проводили в изолированной затемненной комнате с постоянным освещением. Расстояние между наблюдателем и экраном составляло 260 см. Размерность матриц — 10 × 10 элементов Габора. Угловые размеры матриц составляли 10°, размер каждого элемента Габора был равен 1°. Пространственная частота решетки Габора составляла четыре цикла на угловой градус, что соответствовало четырем периодам на элемент и оптимальной контрастной чувствительности к пространственной частоте. Максимальный контраст решеток, рассчитанный по формуле Майкельсона, был равен 0,9. Ориентация каждой из ста решеток в матрице могла быть от 0 до 165° с шагом в 15°. Использовали три типа матриц, различающихся по степени их упорядоченности. В минимально упорядоченном стимуле ориентация решеток была квазислучайной и каждая из двенадцати ориентаций была представлена в матрице равновероятно. В случайной матрице решеток каждой ориентации было 8,3 %. Исключали появления в матрице различных фигур, образованных соседними решетками Габора, минимизировали вероятность равенства ориентаций между соседними элементами. Упорядоченные матрицы различались по количеству элементов, имеющих одинаковую ориентацию. Доминирующая ориентация в стимуле могла быть либо вертикальной, либо горизонтальной. Созданы три набора матриц с разной реализацией распределения упорядоченных и случайных элементов Габора. Решетки одной ориентации в матрице — 8 % (случайная матрица), 24 и 56 %, но в каждой реализации положение решетки определенной ориентации менялось случайным образом. Каждую матрицу из трех наборов предъявляли на 30, 60, 130, 250, 500, 1000 мс. После каждого предъявления тестового стимула предъявляли новую случайную (8 %) маску с новым случайным положением решеток определенной ориентации в матрице. Изображения матриц даны в предыдущем параграфе на рис. 14.6. Там изображены восемь матриц с разной степенью упорядоченности.

Особенность разработанных для этих исследований характеристик стимула и маски заключалась в минимизации различий между ними, так как число элементов в матрице, пространственная частота, контраст оставались постоянными. Изменяли только величину упорядоченности в тестовой матрице. Следовательно, маскировка была максимально возможной. Одновременный поворот всех решеток в матрице приводил к смене стимулов и к смене маски.

В процессе исследования испытуемый должен был классифицировать тестовые матрицы как вертикальные или горизонтальные и вне зависимости от степени уверенности в правильности выбора нажимать соответствующую кнопку на пульте в соответствии с инструкцией.

Электроэнцефалограмму головного мозга регистрировали в затылочной, теменной, височной, центральной и лобной областях согласно международной системе расположения электродов «10—20». Сигнал отводили монополярно, относительно объединенного ушного референта. Полоса пропускания усилителей составляла 1–100 Гц, частота дискретизации 1000 Гц. Для удаления артефактов моргания и движения глаз параллельно записывали электроокулограмму, регистрируемую биполярно с двух электродов, расположенных вокруг левого глаза испытуемого. Регистрирующий компьютер был соединен со стимулирующим компьютером через стандартный COM-порт, через который передавался синхросигнал о типе и начале предъявления тестового стимула. Уточнение времени предъявления тестовых матриц осуществляли с помощью светочувствительного элемента, прикрепленного к экрану и посылающего дополнительный синхросигнал о начале предъявления непосредственно на усилитель. Зрительные вызванные потенциалы усредняли на каждый из трех типов тестовых стимулов, различающихся по степени упорядоченности для каждого времени предъявления, предварительно объединив ответы на матрицы, с преобладанием вертикальных и горизонтальных решеток. Каждый усредненный зрительный вызванный потенциал был результатом ста пятидесяти предъявлений стимула. Общее время записи составляло девяносто минут. Через каждые пять минут делали перерывы.

В качестве статистических методов в работе использовали критерий Вилкоксона, если распределение было отлично от нормального, или однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) языка статистики *R* при нормальном распределении данных. Перед проведением однофакторного дисперсионного анализа данные проверяли в среде для расчетов *R* на нормальность по критерию Шапиро—Уилка. Отличия при сравнении групп данных считали статистически достоверными, если вероятность ошибки не превышала 5 %. В психофизической части эксперимента анализировали зависимость количества правильных ответов и времени реакции от времени предъявления матриц и содержания в них однонаправленных элементов. На рис. 14.10 представлены данные психофизической части экспериментов, усредненные по результатам всех двадцати испытуемых.

При увеличении времени предъявления стимулов с 30 до 60 мс количество правильных ответов достоверно не изменялось. Значимое увеличение результативности распознавания этих матриц наблюдали при предъявлении стимулов на 130 мс и более. После 250 мс результативность распознавания доминирующей ориентации выходила на плато. Распознавание случайных матриц не зависело от времени предъявления стимула и составляло в среднем 47 %, что соответствовало уровню случайного выбора.

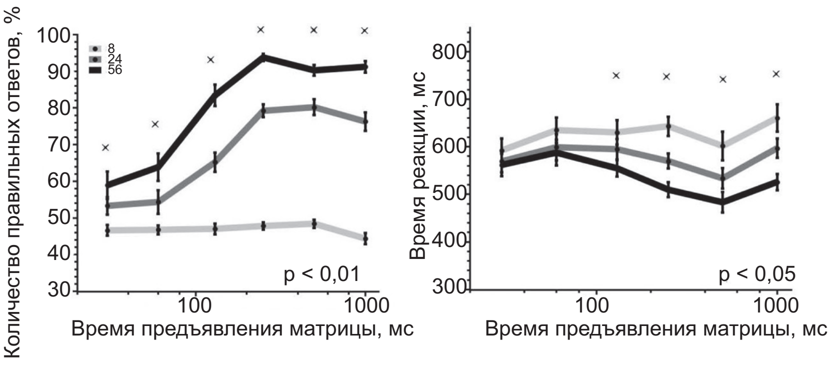


Рис. 14.10. Зависимость количества правильных ответов и времени реакции от времени предъявления матриц различной степени упорядоченности; 8, 24, 56 — три типа матриц, где цифра обозначает количество однонаправленных элементов в матрице. Погрешности, обозначенные вертикальными линиями, — ошибка среднего. Звездочка — статистически значимое отличие в распознавании трех типов матриц

Как и следовало ожидать, лучше всего испытуемые справлялись с задачей распознавания доминирующей ориентации при предъявлении наиболее упорядоченных матриц (степень упорядоченности 56 %), максимальное количество правильных ответов составляло 94 %. Матрицы со степенью упорядоченности, равной 24 %, испытуемые распознавали заметно хуже, максимальное количество правильных ответов составляло 80 %. Количество правильных ответов достоверно увеличивалось по мере увеличения степени упорядоченности матрицы при всех временах предъявления стимула.

Среднее время реакции зависело от типа матриц и не зависело от времени предъявления стимула. Среднее время реакции на случайные матрицы составляло 627 мс, для матриц со степенью упорядоченности 24–577 мс, для матриц со степенью упорядоченности 56–537 мс. Таким образом, чем более упорядочена матрица, тем короче время реакции и в ней легче распознать доминирующую ориентацию. Однако эта тенденция не прослеживается при коротких временах предъявления стимулов. При предъявлении матриц на 30 и 60 мс достоверной зависимости времени реакции от степени упорядоченности не обнаружено. Первые достоверные отличия времени реакции от типа матриц наблюдали при временах предъявления стимула начиная от 130 мс и более.

В электрофизиологической части исследования анализировали зависимость амплитуды и латентного периода основных компонентов усредненного зрительного вызванного потенциала от времени предъявления стиму-

ла и степени упорядоченности матриц. Наиболее сложный комплекс волн регистрировали в затылочной области, где можно было выделить относительно ранние компоненты. На рис. 14.11а представлены усредненные по всем наблюдателям зрительные вызванные потенциалы, регистрируемые в затылочном отведении *Oz*, в ответ на матрицы, предъявляемые на разное время, от минимального времени (30 мс) до максимального (1000 мс).

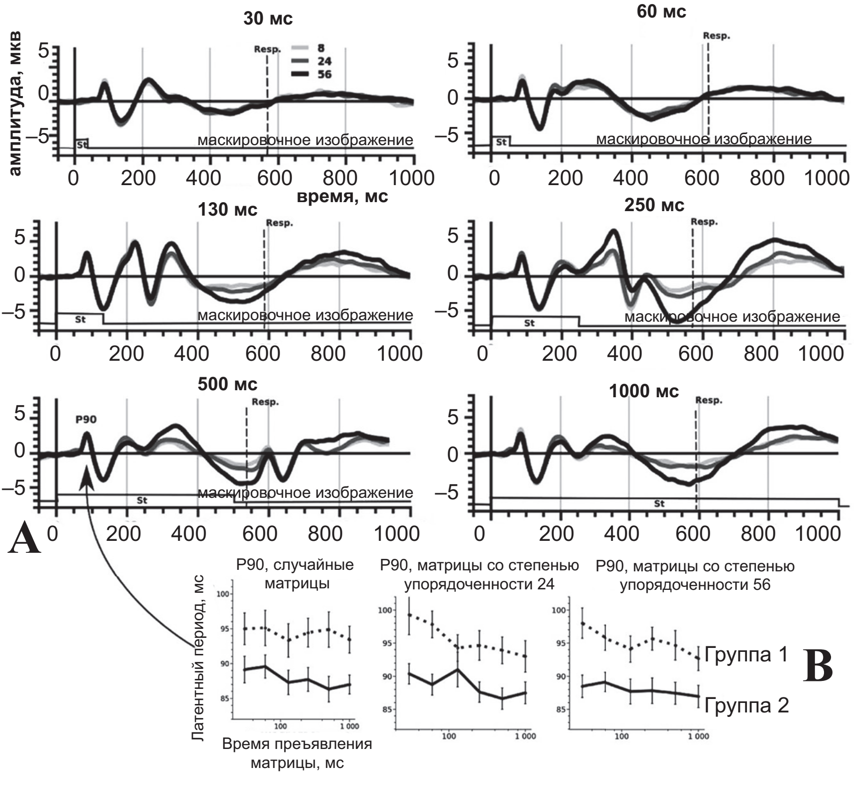


Рис. 14.11. (A) — зрительные вызванные потенциалы человека, регистрируемые в затылочном отведении *Oz*, при разном времени предъявления матриц со степенью упорядоченности 8, 24 и 56 %. Усреднены данные по двадцати наблюдателям. *St* — предъявление стимула; *Resp*. — среднее время ответа наблюдателя. (B) — сравнение зависимостей латентных периодов компонента P90 от времени предъявления матриц различной степени упорядоченности для двух групп испытуемых. Статистически достоверное увеличение латентного периода для группы 2 по сравнению с группой 1: для всех типов матриц и времени предъявления вероятность ошибки менее 5 %, кроме матриц со степенью упорядоченности 24 на 130 мс, где отличия не достоверны

В зрительных вызванных потенциалах, регистрируемых в затылочной области, можно было выделить ответы как на включение тестового стимула, так и на его выключение (замена тестовой матрицы на фоновую). Ответы на включение стимула характеризовались стабильным латентным периодом, в то время как ответы на выключение зависели от времени предъявления стимула. В работе изучали ответы на предъявление тестового стимула, в которых выделяли две волны с отрицательной полярностью и четыре волны с положительной полярностью. Для удобства волны были обозначены: P90, N140, P200, P300, N500, P800, где цифры соответствуют латентным периодам каждого компонента.

При коротком времени предъявления стимула на 30 и 60 мс вызванные потенциалы затылочной области не зависели от степени упорядоченности матриц. Первые значимые зависимости амплитуды от типа стимула наблюдали при времени предъявления матриц на 130 мс. При этом возрастала амплитуда поздних волн P300, N500 и P800 в ответ на более упорядоченные матрицы. Достоверных отличий в амплитуде волн в ответ на предъявление матриц со степенью упорядоченности 24 и 8 не обнаружено. При дальнейшем увеличении времени предъявления различия в амплитудах поздних волн вызванных потенциалов сохранялись. Амплитуда ранних компонентов зрительных вызванных потенциалов P90, N140 значимо не изменялась при увеличении времени предъявления стимула и не зависела от степени упорядоченности матриц.

Вызванные потенциалы, регистрируемые в затылочных, теменных, центральных, височных и лобных областях, можно было условно разделить на две группы по форме и компонентному составу: теменно-затылочные и лобно-центральные. В зрительных вызванных потенциалах, регистрируемых в лобно-центральных областях, доминировали поздние волны. Зависимости поздних волн от типа стимула и времени предъявления были аналогичны зависимостям этих же волн, регистрируемых в теменно-затылочных областях. Ранние компоненты в лобно-центральных областях были выражены слабо и не зависели от типа стимула, что объясняется генерацией ранних компонентов зрительных вызванных потенциалов в зрительных, затылочных областях. Минимальное время предъявления стимула, при котором наблюдали отличия в амплитуде лобно-центральных зрительных вызванных потенциалов в зависимости от типа стимула, составляло 130 мс, так же как и для затылочных зрительных вызванных потенциалов. Существенным отличием зрительных вызванных потенциалов в лобно-центральных областях была зависимость латентного периода позднего компонента P400 от типа матриц. Это положительная волна возникала в среднем через 400 мс после предъявления стимула, ее латентный период увеличивался примерно на 40 мс при предъявлении менее упорядоченных, соответственно более сложных для распознавания стимулов.

В ходе проведения исследований было отмечено, что не все наблюдатели одинаково хорошо справляются с задачей распознавания доминирующей ориентации, особенно при коротких временах предъявления матриц. Примерно половина испытуемых указывала на сложность выполнения поставленной задачи при временах предъявления стимула менее чем на 250 мс. При предъявлении стимулов на 60 и 30 мс эти наблюдатели не успевали правильно определить тип стимула, и результативность выполнения задачи у них соответствовала случайному угадыванию. Другая половина испытуемых справлялась с задачей при всех временах предъявления матриц.

В настоящее время большой интерес представляет анализ различий между наблюдателями в популяции. Даже несмотря на небольшую выборку, обратим внимание на эти отличия. Проведенный нами кластерный анализ методом *k*-средних, позволил разделить наблюдателей на группы. Как показано на рис. 14.12, при предъявлении матриц на 60 мс наблюдатели разделяются на две группы испытуемых, различающихся по количеству правильных ответов.

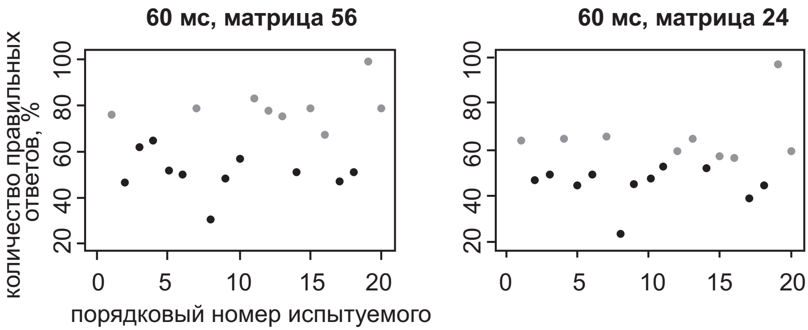


Рис. 14.12. Разделение наблюдателей с помощью кластерного анализа на две группы по результативности распознавания матриц со степенью упорядоченности 24 и 56. Серые точки — испытуемые с высокой результативностью распознавания матриц; черные точки — испытуемые с низкой результативностью распознавания

В соответствии с результатами кластерного анализа, разделившего наблюдателей на две группы, мы изучили результаты психофизических данных и получили две аналогичные группы наблюдателей на основании другого критерия — наличие/отсутствие статистически достоверных отличий (ANOVA) в распознавании матриц разной степени упорядоченности при коротких временах предъявления (30 и 60 мс). На основании этого критерия: группа 1 — испытуемые, успешно справляющиеся с задачей распознавания доминирующей ориентации в матрицах при коротких време-

нах предъявления стимула (девять человек); группа 2 — испытуемые, не справляющиеся с задачей распознавания при коротких временах предъявления стимула (одиннадцать человек).

Анализ данных, приведенный ниже, основан на разделении наблюдателей на группы с помощью второго критерия — различия в распознавании разных типов матриц при коротких временах предъявления.

На рис. 14.13 представлены результаты психофизических данных для двух групп испытуемых. Как видно из рисунка, среднее количество правильных ответов в группе 1 выше, чем в группе 2 при предъявлении матриц со степенью упорядоченности 24 и 56 % на 30, 60 и 130 мс. При более длительном предъявлении стимула различия между группами пропадают. При распознавании случайных матриц (степень упорядоченности 8 %) процент выбора доминирующей ориентации составлял около 50 % вне зависимости от времени предъявления стимула в обеих группах усреднения.

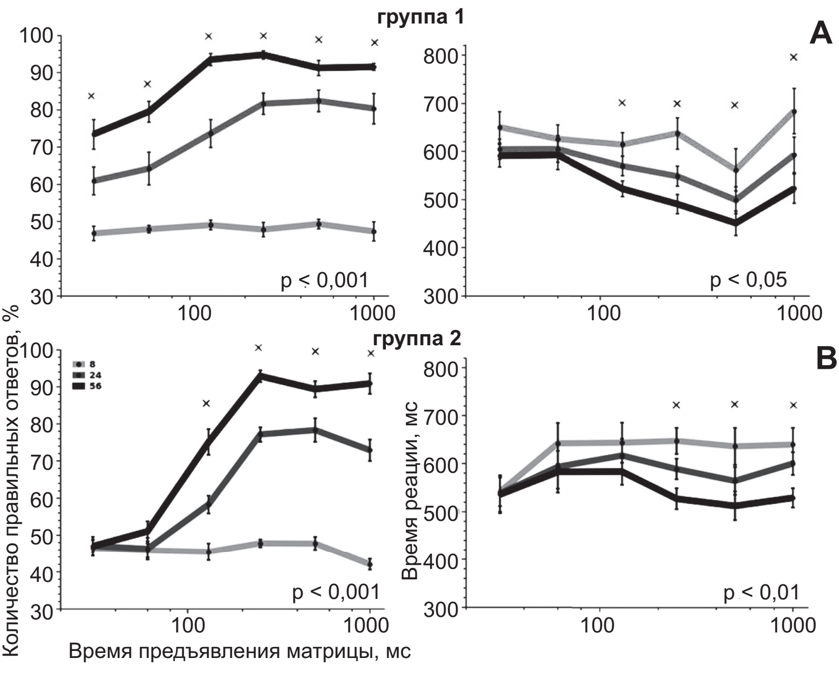


Рис. 14.13. Зависимость количества правильных ответов и времени реакции от времени предъявления матриц различной степени упорядоченности. (A) — результаты для первой группы наблюдателей (девять человек). (B) — результаты для второй группы наблюдателей (одиннадцать человек)

При предъявлении стимулов на 30 и 60 мс для испытуемых в группе 1 была показана достоверная зависимость результативности распознавания от степени упорядоченности матриц, в то время как в группе 2 количество правильных ответов не зависело от типа матриц. Увеличение количества правильных ответов в группе 1 при увеличении степени упорядоченности стимула подтверждает предположение о том, что испытуемые в этой группе справлялись с задачей распознавания доминирующей ориентации даже при таком коротком времени предъявления стимула, как 30 мс. В группе 2 испытуемые начинают справляться с задачей распознавания при предъявлении стимулов на 130 мс, при этом времени предъявления на результативность их ответов начинает влиять сложность изображения.

Значимое влияние сложности задачи на время реакции мы наблюдали в группе 1 испытуемых при предъявлении стимулов на 130 мс и более, в то время как в группе 2 значимые изменения от сложности задачи начинаются от 250 мс и более. Время реакции у испытуемых в группе 1 было значимо меньше, чем в группе 2 в диапазоне времен предъявления стимулов от 130 до 1000 мс. Предъявление стимула на 30 мс вызывало уменьшение времени реакции в группе 2. Вероятно, это связано с тем, что испытуемые, не успевающие разглядеть изображение, реагировали нажатием на кнопку только на предъявление тестовой матрицы, не принимая решения. Соответственно чем короче время предъявления (в интервале времен 30–60 мс), тем быстрее эти испытуемые нажимали на кнопку.

На основании разделения испытуемых на две группы по результативности распознавания вызванные потенциалы были разделены на аналогичные группы: группа 1 — успешно справляющаяся с задачей распознавания при коротком времени предъявления стимула, и группа 2 — не справляющаяся с данной задачей. Была проанализирована зависимость амплитуды основных волн зрительных вызванных потенциалов от времени предъявления матриц отдельно для двух групп испытуемых.

Было обнаружено, что амплитуда всех компонентов зрительных вызванных потенциалов в группе 1 больше, чем в группе 2, практически при всех временах предъявления. Суммарная амплитуда всех компонентов зрительных вызванных потенциалов может отражать общее количество нейронов, вовлеченных в процесс распознавания. Статистический анализ показал, что суммарная амплитуда всех компонентов зрительных вызванных потенциалов, усредненная по всем временам предъявления, достоверно больше в группе 1 по сравнению с группой 2. Это явление наблюдали в зрительных вызванных потенциалах, регистрируемых в затылочной области в ответ как на упорядоченные, так и на неупорядоченные матрицы. Наиболее выраженные отличия между группами наблюдали для компонента P300. Его амплитуда достоверно больше в группе 1 при предъ-

явлении матриц на короткое время, от 30 до 130 мс. В зрительных вызванных потенциалах, регистрируемых у испытуемых в группе 2 при этих временах предъявления, волна P300 зачастую отсутствовала.

Наряду с увеличением амплитуды зрительных вызванных потенциалов в группе 1 наблюдали достоверное уменьшение латентного периода раннего компонента P90, регистрируемого в затылочной области, и латентного периода компонента центральной области P180 для каждого времени предъявления при любом типе матриц. Среднее значение латентного периода компонента P90, измеренное по ответам на все типы матриц, в группе 2 было больше, чем в группе 1, на 7 мс (рис. 14.13 В). Для компонента P180 наблюдали аналогичное увеличение латентного периода в группе 2 на 27 мс.

В данной работе мы использовали три типа стимулов, различающихся по степени ориентационной упорядоченности, то есть по количеству однонаправленных элементов, содержащихся в изображении. В задаче определения доминирующей ориентации в стимуле относительное количество элементов с одной ориентацией является ключевым для принятия правильного решения. Это подтверждают результаты настоящего исследования и наших предыдущих работ [Хараузов и др., 2007; Шелепин и др., 2009; 2011; Harauzov et al., 2016]. В общем случае количество правильных ответов увеличивается, а время реакции уменьшается при увеличении степени упорядоченности стимула. Это говорит о связи упорядоченности матриц и сложности распознавания доминирующей ориентации в изображении — чем меньше в матрице однонаправленных элементов, тем сложнее сделать выбор. Наши результаты согласуются с литературными данными, в которых было показано, что время реакции различается в зависимости от сложности задачи [Величкова, Василев, 1976; Bacon-Mace et al., 2005]. Следует отметить, что время реакции зависит не только от сложности стимула, но также и от контраста, его окружения [Obrenovic et al., 1996]. Но в наших экспериментах основные физические характеристики матриц, такие как общая площадь, число фрагментов, яркость, контраст, оставались неизменными.

Полученные данные психофизических измерений показали, что увеличение длительности предъявления стимула увеличивает вероятность правильного распознавания. Однако эта зависимость — нелинейная. Так, усредненное по всем испытуемым количество правильных ответов начинает значимо возрастать только при предъявлении стимулов на 130 мс и больше. Начиная с этого времени предъявления наблюдается достоверное влияние сложности задачи на время реакции. Эти результаты говорят о том, что времени предъявления стимула на 130 мс достаточно для того, чтобы все испытуемые могли справляться с задачей распознавания доминирующей ориентации в изображении. При меньшем времени предъявления распознавание затруднено, а для половины испытуемых невозможно. Следует отметить,

что полученный в наших исследованиях временной порог распознавания не является абсолютно точным, так как точность измерения ограничивается количеством времен предъявления стимула. В работе было использовано шесть времен предъявления, и реальный порог распознавания данного класса стимулов находится в интервале от 60 до 130 мс. По литературным данным, порог распознавания различных изображений находится в интервале 50–60 мс [Pins, Ffitche, 2003]. Длительность межстимульного интервала также оказывает влияние на распознавание стимулов [Bacon-Mace et al., 2005; Del Cul et al., 2007]. Маскировочное изображение, которое предъявляли через 40–60 мс и более после стимула, практически не оказывало влияния на распознавание коротко предъявляемых тестовых изображений [Del Cul et al., 2007]. В качестве стимулов были использованы фотографии различных животных и натуральных сцен, которые демонстрировали на 6 мс. После тестового стимула следовала динамическая маска с фильтрованным белым шумом, которая, по мнению авторов, и влияла на увеличение порога распознавания тестовых стимулов.

В наших условиях стимуляции половина испытуемых не справлялась с задачей при предъявлении стимула даже на 60 мс. Относительно высокий временной порог объясняется тем, что в наших экспериментах использовали более сложные стимулы и оптимальные маскировочные изображения, то есть максимально близкие к тестовым изображениям по пространственным характеристикам. К тому же перед испытуемыми была поставлена принципиально другая задача — определение доминирующей ориентации целого изображения.

Электрофизиологические исследования показали, что вызванные потенциалы в ответ на длительное предъявление стимулов зависят от количества однонаправленных элементов в изображении. Согласно полученным данным, более упорядоченные стимулы вызывают увеличение амплитуды относительно поздних компонентов зрительных вызванных потенциалов, наблюдаемое практически во всех отведениях. Это подтверждает полученные ранее результаты [Хараузов и др., 2007; Шелепин и др., 2009; 2011]. Учитывая, что основные физические характеристики матриц оставались неизменными, ранние компоненты зрительных вызванных потенциалов, которые не зависели от типа матриц, можно рассматривать как отражение процессов первичной обработки зрительного сигнала. Следует отметить, что в предыдущих работах нами была показана зависимость волны P200 от типа стимула [Хараузов и др., 2007; Шелепин и др., 2009; 2011]. Амплитуда этой волны увеличивалась по мере уменьшения степени упорядоченности. В данной работе мы тоже наблюдали увеличение волны P200 в ответ на предъявления менее упорядоченных матриц практически при всех временах предъявления стимула. Однако различия не достигали уровня ста-

тистической достоверности. Можно предположить, что эта волна отражает активность более сложных процессов описания изображений, таких как процессы объединения фрагментов изображения в единое целое.

Более поздние волны, на которые оказывала влияние упорядоченность стимула, можно соотнести с процессами распознавания и принятия решения о типе стимула, с моторными реакциями и возможными оценочными процессами о сделанном выборе [Сельченкова и др., 2011]. Так, относительно поздний компонент зрительных вызванных потенциалов, с которым была обнаружена наибольшая корреляция правильности ответов испытуемых, регистрировали через 300 мс на наиболее простые для распознавания стимулы [Philiastides et al., 2006]. По мнению исследователей, через 300 мс после предъявления изображений в вызванных потенциалах отражается процесс принятия решения.

Анализ зависимости зрительных вызванных потенциалов от типа и времени предъявления стимула показал, что достоверные изменения амплитуды наблюдаются при временах предъявления 130, 250, 500 и 1000 мс. Вызванные потенциалы в ответ на предъявление матриц на более короткое время не зависели от степени упорядоченности стимула. Таким образом, 130 мс — это минимальное время предъявления стимула (в наших условиях стимуляции), при котором еще наблюдаются отличия в форме зрительных вызванных потенциалов в зависимости от типа стимула. Отличия наблюдали в амплитуде компонента P300 и более поздних волн, а также в изменениях латентных периодов волны P410, регистрируемой в центральных и лобных областях. Первые достоверные изменения в вызванных потенциалах в зависимости от типа стимула наблюдаются через 300 мс после предъявления стимула. Это выражалось в увеличении амплитуды компонента P300 в ответ на более легкие стимулы по сравнению с менее упорядоченными, сложными для распознавания матрицами. Полученные нами данные согласуются с литературными, по которым амплитуда волны P3 больше при выполнении легких задач по сравнению с более трудными [Kok, 2001; Pins, Ffitche, 2003]. Более поздние волны зрительных вызванных потенциалов (N500 и P800) имели аналогичные P300 зависимости как от времени, так и от типа стимула. Эти компоненты зависят от количества полученной наблюдателем информации, необходимой для распознавания изображения, и могут указывать как на степень субъективной уверенности испытуемого в правильности решения, так и, вероятно, могут являться отражением последействия процесса распознавания [Шелепин и др., 2009]. Полученные нами данные подтверждают предположения А. М. Иваницкого о том, что этап распознавания и принятия решения может занимать более длительное время, чем первые этапы, отражающие синтез всей информации о стимуле [Иваницкий и др., 1984].

Полученные в ходе электрофизиологических исследований данные согласуются с результатами психофизических измерений, в которых начиная со 130 мс количество правильных ответов значимо увеличивается, а время реакции начинает зависеть от сложности задачи. Таким образом, с помощью изменения времени предъявления стимула, необходимого для распознавания, удалось показать, что в момент, когда все испытуемые начинают более или менее правильно справляться с задачей, у них увеличиваются амплитуды компонентов P300 и более поздних волн. Это позволяет соотнести компонент P300 с началом распознавания испытуемыми доминирующей ориентации в изображении. Результаты подтверждают ранее полученные нами данные и литературные данные, в которых компонент P300 связывают с распознаванием и принятием решения [Хараузов и др., 2007; Шелепин и др., 2009; Kok, 2001; Pins, Ffitche, 2003]. Об этом свидетельствуют увеличение амплитуды волны P300 и увеличение латентного периода компонента при распознавании более сложных изображений [Philiastides et al., 2006].

Как было отмечено в результатах работы, в ходе экспериментов не все испытуемые одинаково хорошо справлялись с задачей распознавания доминирующей ориентации при коротких временах предъявления матриц. Интересным представляется вопрос о том, почему существуют такие различия между испытуемыми. Согласно модели динамического внимания, существуют внешние ритмы, которые задаются событием, предъявлением тестового стимула через каждые 2 сек., и внутренние ритмы, которые активно генерируют временные ожидания испытуемого о предстоящем событии [Сельченкова и др., 2011; Jones, Boltz, 1989]. Если у наблюдателя происходит небольшое смещение во времени внутреннего ритма ожидания, то испытуемый не сможет с точностью оценить, через какое время будет предъявлен тестовый стимул. Можно предположить, что группа испытуемых, которая не справляется с задачей распознавания при коротких временах предъявления, пропускает стимул короткой длительности, поскольку не ожидает его увидеть ровно через 2 сек. Чтобы проверить это допущение, испытуемым был задан вопрос о том, играют ли они на музыкальных инструментах, поскольку известно, что игра на музыкальном инструменте требует наличия чувства ритма. Результаты опроса показали, что наблюдатели в группе, которая определяет доминирующую ориентацию стимулов короткой длительности, в отличие от испытуемых второй группы играли и продолжают играть на одном или более музыкальных инструментах. Таким образом, просматривается связь между ожиданием наблюдателя включения стимулов короткой длительности (30, 60 мс) и результативностью их распознавания [Сельченкова и др., 2011]. Происходит согласованная работа нейронных сетей, обеспечивающих целенаправленное поведение. Это согласование — неосознаваемый процесс. Чувство вну-

треннего ритма вырабатывается путем согласования внутренних процессов, вероятно, частично врожденных и частично выработанных в процессе обучения работе с музыкальными инструментами.

Разделение испытуемых по способности распознавать изображения, предъявляемые на короткое время, и анализ их зрительных вызванных потенциалов подтверждают высказанные предположения о связи компонента P300 и процессов распознавания. Так, у испытуемых, не успевающих распознать тип матрицы и, по сути, нажимающих наугад кнопку мыши в ответ на появление стимула, P300 либо отсутствовал, либо имел гораздо меньшую амплитуду, чем у тех, кто активно различал тип стимула. При более длительном времени предъявления стимула, когда испытуемые в обеих группах начинали одинаково хорошо справляться с задачей, значимые отличия в амплитуде P300 пропадали. Эти результаты подтверждают исследования решения сложных перцептивных задач, если степень «сознательного усилия» субъекта в когнитивной переработке мала, то компонент P300 может совсем не возникать [Иваницкий и др., 1984; Del Cul et al., 2007]. Другие исследователи показывали испытуемым решетки на пороговом уровне и сравнивали результаты измерений, при которых субъект видел или не видел решетку [Pins, Ffitche, 2003]. Было обнаружено отличие в волне, которая развивалась, начиная с 260 мс в теменной и лобной областях. Авторы полагают, что этот компонент отражает сознательное восприятие зрительных стимулов. Это также согласуется с нашими результатами, в которых амплитуда компонента P300 была достоверно больше в группе испытуемых, которые успешно распознавали доминирующую ориентацию при предъявлении матриц на короткое время по сравнению с группой, не справляющейся с задачей при аналогичной длительности тестового стимула.

По данным, полученным в нашей работе, суммарная амплитуда всех компонентов зрительных вызванных потенциалов оказалась достоверно выше у испытуемых, которые успевали различать матрицы, предъявляемые на короткое время. Согласно литературным данным, суммарная амплитуда всех компонентов зрительных вызванных потенциалов может отражать общее количество нейронов, вовлеченных в процесс распознавания [Regan, 1989]. Соответственно эти испытуемые могут характеризоваться вовлечением больших нейронных ресурсов в процессе распознавания. Это предположение подтверждает литературные данные о связи индивидуальных различий в размерах первичной зрительной коры с остротой зрения наблюдателей [Duncan, Boynton, 2003]. Возможно, это происходит за счет большей концентрации внимания, так как, по литературным данным, процесс внимания увеличивает в целом амплитуду всех компонентов [Luck et al., 2003]. Уменьшение латентного периода отдельных волн зрительных вызванных потенциалов и времени реакции в группе испытуемых, успешно

справляющихся с задачей распознавания при коротких временах предъявления стимула, может свидетельствовать о различной скорости процессов распознавания изображений у отдельных испытуемых. Так, согласно современным представлениям, интервал между предъявлением стимула до моторного ответа отражает скорость протекания нейрофизиологической, когнитивной и информационной обработки, которые вызваны действием стимула на сенсорную систему испытуемого [Obrenovic et al., 1996].

Таким образом, в проведенной работе было продолжено исследование взаимосвязи во времени временных порогов распознавания и возникновения отличий в вызванных потенциалах и подтверждены результаты, полученные еще в 1950-х годах профессором Военно-медицинской академии И. А. Пеймером, согласно которым отдельные волны зрительных вызванных потенциалов могут отражать активность процессов распознавания изображений. Однако впервые показано, что временные характеристики этих процессов определенным образом отличаются у разных испытуемых [Сельченкова и др., 2011]. Выявлены две группы наблюдателей с разными временными характеристиками восприятия и развития вызванных потенциалов: систематически играющие на музыкальных инструментах и не играющие на музыкальных инструментах вообще. Особенно ярко различия проявились при коротких условиях предъявления в условиях идеальной маскировки, разработанной для этих измерений. Играющие на музыкальных инструментах благодаря внутренним ритмам и временному прогнозированию могут видеть изображения в условиях, когда для людей, не имеющих отношения к музыке, восприятие отсутствует. Более того, эти работы представляют интерес еще и с точки зрения того, насколько осознаваемы были восприятие и правильное принятие решения музыкально одаренными и тренированными людьми в условиях маскировки коротких предъявлений зрительных задач.

14.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОРЯДКА И ХАОСА

Зрительные вызванные потенциалы демонстрируют преимущественно временные свойства процесса восприятия и принятия решения. Для локализации этого процесса в мозге мы провели фМРТ-измерения.

По данным усреднения, активность мозга в условиях пассивного наблюдения представлена преимущественно в дорсальных, затылочных областях коры. В условиях активного выбора происходит значительное увеличение

активации во фронтальной области коры головного мозга. Выравнивание статистических карт с анатомическими изображениями и трансформация результатов в соответствии с атласом Талейраха (Talairach atlas) показывают, что эти области активации соответствуют областям по Бродману BA6, BA9, BA10 и BA24, но в разные фазы — в активации и покоя.

Заметим, что имеются принципиальные различия между вычитанием распределения интенсивности сигнала в период активации 1 из распределения интенсивности сигнала в период активации 2, и наоборот. В этой ситуации мы видим, что активные области локализованы рядом, но еще включают область поясной извилины — BA24. Сравнение BOLD-ответов в пассивном и активном режимах фМРТ-картирования показывает, что активация во фронтальных областях появляется только тогда, когда испытуемые активно воспринимают стимулы и принимают решение о них. Было сделано предположение, что фронтальные области BA6, BA9, BA10 и BA24 принадлежат к нейронным ансамблям, ответственным за принятие решений, по крайней мере в наших экспериментальных условиях. Проявляются оппонентные отношения BA6, BA9, BA10 и передних отделов поясной извилины BA24. Между активированными зонами мозга (а именно между затылочными зрительными областями и областями фронтальной коры, принимающей решения), выявленными в наших исследованиях методом фМРТ, мы реконструировали межкорковые связи, которые обеспечивают их взаимодействие. Реконструкцию осуществляли с помощью метода диффузно-тензорной томографии (DTI: diffusiontensor imaging) и последующей обработки изображений проводящих путей с привязкой к активированным участкам коры головного мозга испытуемых во время их исследования в активном протоколе. С помощью этой техники и программного обеспечения были реконструированы волокна (аксоны), начинающиеся от зрительных областей в затылочной области и проецирующиеся в области принятия решения во фронтальной доле, локализованные с помощью фМРТ. Этим же методом установлены и обратные аксонные связи между фронтальными центрами принятия решений и областями зрительной коры в затылочной области. В результате выделены пути, идущие из затылочной во фронтальную область и из фронтальной в затылочную кору. Это так называемые восходящие и нисходящие связи.

Ранее было показано, что принятие решений о стимулах, имеющих эмоциональную окраску, вовлекает области вентральной части фронтальной коры [Bechara et al., 2005], в то время как изображения без эмоциональной окраски в наших исследованиях вовлекают другие, более дорсальные области фронтальной коры. В процессе выполнения задачи в лобной доле мозга испытуемого формируются мозаичные центры принятия решений [Шелепин и др., 2009].

Наряду с результатами, показывающими локализацию процесса принятия решений об изображениях, временные характеристики работы лобных центров принятия решений мы исследовали электрофизиологическими методами. Результаты показали, что латентность ранних компонентов вызванных потенциалов не зависит от степени упорядоченности в предъявляемых тестовых матрицах. Известно, что вызванные потенциалы в первые 100 мс после стимуляции в затылочной области отражают нейронную активность, кодирующую такие характеристики стимулов, как контраст, яркость и пространственная частота, но в этих экспериментах они были постоянными. Для наших тестовых изображений компоненты вызванных потенциалов около 200 мс отражают нейронную активность, связанную со следующим уровнем обработки, таким как восприятие целостного образа или восприятие ориентации элементов. Этот вывод согласуется с результатами других исследований.

Интересно, что при пассивном наблюдении ранние компоненты во фронтальной коре не выражены. Вероятно, что без задачи выбора и принятия решений взаимодействие затылочной и лобной коры незначительно и выделение отклика на поверхности головы затруднено. В наших экспериментах при задаче активного выбора в лобных зонах выражены ранние компоненты, а латентность компонентов после 250 мс во фронтальной области начинает зависеть от степени упорядоченности изображений. Это также коррелирует с временем реакции в психофизических экспериментах. Так, мы полагаем, что во временном интервале 250 и 500 мс после предъявления стимулов решение «принимается» во фронтальной коре. Поздние волны, которые появляются примерно через 600–900 мс после включения стимула, отражают либо уровень уверенности испытуемого в точности решения, либо сравнение принятого решения с характеристиками стимула. Процесс сравнения может косвенно отражать работу механизма обнаружения ошибок [Bechtereva et al., 2005]. Вероятно, это осуществляется путем сравнения действующей активности затылочно-фронтальной сети с состоянием сети базового режима, что видно из наших данных фМРТ. По вызванным потенциалам это видно по поздним волнам, рассмотренным в начале гл. 14.

Локализацию центров принятия решений в коре головного мозга осуществляли с помощью использования фМРТ в тех же экспериментальных условиях [Fokin et al., 2006; Shelepin et al., 2006; Фокин и др., 2007; Хараузов и др., 2007; Шелепин и др., 2009; 2011]. В экспериментальном протоколе с пассивным наблюдением матриц с низкой степенью упорядоченности активность вызывалась не только в затылочных областях, но и в теменной области. Эта активация была типичной для пассивного наблюдения. Однако не было активации во фронтальной области. Активация области V5

(область, где нейроны отвечают на синхронное движение) в нашем случае была обусловлена когерентным вращением, то есть когерентным изменением ориентации решеток Габора, которые испытуемый воспринимал как вращение. Следует заметить, что результаты, полученные у всех испытуемых, аналогичны, следовательно, в будущем настоящий протокол может быть использован и в клинических исследованиях.

В процессе нашей работы мы обнаружили разные ответы при использовании различных экспериментальных протоколов. При активном протоколе, требующем принятия решения, испытуемый выполняет активный выбор, базирующийся на доминирующих ориентациях элементов матрицы. В активном экспериментальном протоколе активация проявляется во фронтальной области. Если сравнить стимуляцию матрицами, имеющими высокую и низкую упорядоченности, записи показывают поразительную разницу в распределении активности в лобных областях BA6, BA9, BA10 и BA24. Это различие демонстрирует большое число локусов активности в различных частях коры. Активное наблюдение приводит к активированию локусов во фронтальной коре, отражающих работу центров принятия решений. Эти данные частично согласуются с хорошо известными исследованиями [Bechara et al., 2005]. Но в этих исследованиях принятие решения, сделанное испытуемым, обычно ассоциируется с эмоциональным выбором. Вероятно, это второй механизм принятия решений, на базе функционирования структур, взаимосвязанных с эмоциональной сферой [Heerkeren et al., 2004; Bechara et al., 2005]. В нашем исследовании испытуемые должны были принимать решения исключительно о доминирующей ориентации в матрице, то есть о конфигурации сложных фрагментированных изображений, — о ее форме. Решения в наших экспериментах, таким образом, имеют отношение к оценке глобальной ориентации элементов текстуры и зависят от степени упорядоченности внутри стимула. Это означает, что решение задачи должно вовлечь дорсальные зрительные пути, ответственные за описание пространственных отношений. Центры принятия решений при эмоциональном значении стимула являются выходом вентрального пути.

Центры принятия решений о конфигурации объекта и о значении объекта для наблюдателя — это соседние, но разные части фронтальной, а точнее префронтальной, коры. Это заключение подтверждают результаты вычитания распределения интенсивности сигнала в изображениях карт мозга в режимах активности 1 из 2 и вычитания в режимах активности 2 из 1. Механизм принятия решения в нашей экспериментальной парадигме имеет другую локализацию в лобной коре. На этом основании мы можем сделать важное заключение, что фронтальная кора организована как ряд различных зон, каждая из которых выполняет решение в различных задачах и каждая имеет различную локализацию. Выделенные

нами области соединены между собой аксональными связями фронтальной области. Области фронтальной коры соединены прямыми и обратными связями с затылочной корой. Наши результаты демонстрируют, что в мозге, вероятно, имеются области, осуществляющие решения по множественным критериям и конфликтующим оценкам [Saaty, 1980; 2005]. Предполагаем, что центры принятия решений, работающие с применением множественных критериев, работают как нейронные оппонентные системы, локализованные во фронтальных областях коры головного мозга человека. Решения в эмоциональной сфере могут конфликтовать с решениями в распознавании образов как конфликты с оппонентными конфигурациями, как оппонентность пространственных отношений. Интересно, что, согласно анализу наших исследований, активацию областей, захватывающих поясную извилину, в активном протоколе исследования мы можем видеть не только непосредственно по данным фМРТ, но и косвенно — по электрофизиологическим данным. Амплитуда и латентные периоды поздней волны, развивающейся в интервале 500–1000 мс, то есть после моторного ответа, коррелируют с принятием решения. Эта волна отражает процесс оценки собственных решений после реакции испытуемых, в основе которого лежит физиологический механизм обнаружения ошибок [Bechtereva et al., 2005]. В психологической литературе эти процессы получили название оценки уровня риска уже принятого решения [Кочетков и др., 1993; Шендяпин и др., 2010; Tversky et al., 1981]. Еще один важный фактор — уверенность или неуверенность в принятии решения с учетом вероятности происходящих событий [Clark, 2009]. Реципрокное взаимодействие в префронтальной коре было продемонстрировано ранее с помощью методов функционального картирования мозга в рамках исследования эмоционально-когнитивного взаимодействия [Damasio, 1990; Northoff et al., 2004]. Наша задача заключалась в исследовании принятия решения в условиях неопределенности, причем вполне конкретной неопределенности, связанной со структурой тестового изображения. В большинстве действующих структур многоканальной обработки информации заложены рекурсивные принципы. Пример рекурсивных изображений дают два зеркала, поставленные друг против друга. Эти принципы распространены в информационных технологиях, связанных с синтезом и с обработкой изображений [Александров, Горский, 1985], в лингвистике и когнитивных исследованиях [Черниговская, 2013].

Как можно принять правильное решение в условиях неопределенности? Впервые, еще в XVIII веке, пути решения этой проблемы сформулировал профессор Санкт-Петербургской академии наук Д. Бернулли [Bernoulli, 1738]. Уже тогда он понял необходимость введения механизма, осуществляющего баланс критериев оценки. Теперь можно предпо-

ложить, что баланс может быть осуществлен с помощью оппонентного механизма взаимодействия разных нейронных структур, аналогично тем оппонентным механизмам, которые известны в первичных структурах зрительной системы. Еще раз подчеркнем, что кроме оппонентных взаимодействий внутри фронтальной коры выделенные нами области фронтальной коры взаимодействуют с областями затылочной коры. В соответствии с нашими данными фронтальные области коры, обеспечивающие выбор и принятие решения, соединены с областями затылочной коры, которая выполняет обработку зрительного сигнала. Следует учесть, что эти прямые и обратные связи, изученные методами прижизненной тензорной трактографии, отражают работу восходящих и нисходящих управляющих сигналов. С помощью метода диффузной трактографии и последующей обработки изображений мы реконструировали пути из затылочной части к тем же центрам принятия решений во фронтальной области, которые были локализованы с помощью фМРТ. Таким образом, мы идентифицировали, где в мозге «принимается» решение о степени упорядоченности текстур, изображений, нейтральных для наблюдателя. Эта область — не та часть лобной коры, которая выделяет эмоционально значимые стимулы и которая была выделена ранее [Damasio, 1990; Northoff et al., 2004]. Так, при различении стимулов, нейтральных и имеющих значение для наблюдателя, активируются различные участки во фронтальной коре. Эта «находка» позволила предположить существование нескольких центров принятия решений во фронтальной области. Между этими областями, вероятно, имеются оппонентные внутрикорковые связи. Такая конструкция фронтальной области обеспечивает адекватное поведение и в повседневных, и в экстремальных ситуациях.

Таким образом, в психофизических, электрофизиологических и фМРТ-исследованиях временного и пространственного картирования мозговой активности мы получили результаты, свидетельствующие о том, что фронтальные зоны коры мозга человека вовлечены в процесс принятия решений. Из настоящего исследования и предшествующих работ можно заключить, что эта область состоит из отдельных зон, распределение в которых активации различно при принятии решений в зависимости от задачи. Временные характеристики этой финальной стадии обработки зрительного сигнала таковы, что процессы принятия решения происходят после стимуляции в интервале 200–500 мс, а в интервале 500–900 мс происходит собственная оценка принятого решения. Одни процессы развиваются до, а другие после моторной реакции. Обработка зрительной информации включает в зависимости от задачи распознавания изображений различные области мозга вплоть до фронтальной коры, связанные восходящими и нисходящими связями и оппонентными взаимодействиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге рассмотрены проблемы нейроиконики — науки, сочетающей изучение механизмов восприятия и понимания изображений человеком, нейрофизиологические механизмы восприятия, необходимые для построения искусственных интеллектуальных систем, способных к целенаправленному поведению. Нейроиконика и иконика имеют в своей основе один корень — образ.

Икона (образ) — это и собственно изображение, и его значение. В технике этот старинный термин применяется с первой трети XX века. В. К. Зворыкин, создатель телевидения, назвал иконоскопом первую серийную электронную передающую телевизионную трубку. С середины века XX века проблема распознавания образов перешла из философской проблемы в математическую и вскоре — в инженерную. Удачный и короткий термин «иконика» начал употребляться в инженерной среде очень широко. В основе иконики — изображения, изучение их свойств, системы синтеза изображений, автоматического распознавания. В рамках иконики человек выступает «потребителем» изображений.

В основе нейроиконики — нейрофизиология человека, возникающие в его мозгу зрительные образы, механизмы, принципы восприятия и распознавания зрительных образов. «Потребителями» результатов исследований нейроиконики являются разработчики новых технологий.

Иными словами, в нейроиконике физиологические механизмы зрительной системы человека и конструкция его «зрительного мозга» — это основа, на которой строят новые технологии, так называемые нейротехнологии.

Иконика связана с технологической революцией конца прошедшего века. Достижения в области иконики обеспечили создание общедоступных технологий получения, обмена, хранения и применения изображений, а также переход к нейроиконике.

Нейроиконика — это наука XXI века. Данная книга — это только введение в новую область. Начавшийся нейротехнологический бум основан уже на доступных цифровых изображениях. Но выраженный акцент связан с применением архитектуры, конструкции «зрительного мозга» человека как основы автономных интеллектуальных систем, решающих задачи распознавания, понимания, принятия решений и новых способов достижения

поставленных целей. Поэтому в книге представлены результаты исследований механизмов центрального и панорамного зрения, каналов осознанно и неосознанно воспринимаемой зрительной информации в обеспечении целенаправленной деятельности человека.

Функциональное построение взаимодействующих нейронных сетей создает паттерны активности, специфичные для каждой экспериментальной ситуации. Большинство этих сетей представляют систему параллельных каналов. Они имеют общее начало — глаза человека, и общий выход — области коры, которые планируют и организуют двигательную реакцию. Каждый из каналов имеет свои особенности, выполняет свою функцию. Особый интерес представляет то, что есть каналы осознанной и неосознанной обработки зрительной информации. Выход каждого из каналов на системы, организующие движение, предполагает, что мы можем зарегистрировать слабые моторные ответы на любые, даже на неосознанные стимулы.

Нами рассмотрены структуры мозга, обеспечивающие важнейшие когнитивные процессы, которые взаимодействуют по принципу оппонентности, то есть осуществляют решения по множественным критериям и по конфликтующим оценкам. Такое взаимодействие может осуществляться и на глобальном (между областями, отвечающими за активное выполнение задачи и пассивное наблюдение), и на локальном уровнях. Эта специфичность активированного мозгового паттерна зависит от целей, мотивов, внутреннего шума, инструкций, обстоятельств и иных экспериментальных условий. Показано, как «выход» сенсорных систем — многоканальный и оппонентный — обеспечивает целенаправленную деятельность человека.

Данная книга является только введением в нейроиконику. Поэтому в ней даны лишь некоторые ключевые положения физиологической оптики, связанные с построением изображений, а из нейрофизиологии обсуждены некоторые вопросы, связанные с работой пространственно-частотных каналов зрительной системы. Книга является отражением работ, в которых автор принимал самое непосредственное участие. Особое внимание уделено вопросам невербальной коммуникации как одному из важнейших стимуляторов развития зрительной системы и пограничной области между нейрофизиологией зрения и нейрофизиологией речи, проблеме чтения и изображений текстов как источников невербальной коммуникации. Технологические аспекты проблемы, связанные с деятельностью нейронных сетей, живых и искусственных, вынесены нами в отдельную коллективную книгу «Нейротехнологии», выходящую вслед за этой монографией.

ЛИТЕРАТУРА

Аверьянова О. С. Зооофтальмология. Глаза пауков // Мир офтальмологии. URL: http://miroft.org.ua/origunalarts/384.html (13.02.2013).

Александров В. В., Горский Н. Д. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход. Л.: Наука, 1985. 190 с.

Алексеенко С. В., Топорова С. Н., Макаров Ф. Н. Микротопография корковых полей 17 и 18 // Сенсорные системы. 1999. Т. 13. № 4. С. 278–283.

Анисимов В. Н., Федорова О. В., Латанов А. В. Параметры движений глаз при чтении предложений с синтаксической неоднозначностью в русском языке // Физиология человека. 2014. Т. 40. № 5. С. 57–68

Антипин М. В. Интегральная оценка качества телевизионного изображения. Л.: Наука, 1970.

Бабенко В. В., Ермаков П. Н., Божинская М. А. Соотношение пространственно-частотных настроек зрительных фильтров первого и второго порядка // Психологический журнал. 2010. Т. 31. № 2. С. 48–57.

Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма в космической медицине // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 2. С. 70–82.

Барабанщиков В. А. Динамика зрительного восприятия. М.: Наука, 1990. 240 с.

Барабанщиков В. А. Восприятие и событие. М.: Алетейя, 2002. 512 с.

Барабанщиков В. А. Экспрессии лица и их восприятие. М.: Институт психологии РАН, 2012. 352 с.

Барабанщиков В. Е., Хозе Е. Г. Восприятие индуцированных эмоциональных экспрессий спокойного лица // Шестая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. Калининград, 2014. С. 142–143.

Бардин К. В. Проблема порогов чувствительности и психофизические методы. М.: Наука, 1976. 396 с.

Бауэр С. М., Бегун П. И., Ламминпия А. М., Шелепин Ю. Е. Об «энергозатратах» глаза при чтении // Сборник материалов конференции «Биомеханика глаза». М.: Ин-т Г. Гельмгольца, 2009. С. 3–6.

Бойко Э. В., Волков В. В., Колесникова Л. Н., Шелепин Ю. Е., Павлов Н. Н. Исследование механизмов нарушения зрительного восприятия при работе человека с видеотерминалами // Сенсорные системы. 1989. Т. 3. № 3. С. 307–313.

Бондарко В. М., Данилова М. В., Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Пространственное зрение. Л.: Наука, 1999. 218 с.

Бондарко В. М., Шелепин Ю. Е., Данилова М. В., У Дзя Лун. Согласованность оценки сложности зрительных изображений с четким видением // Сенсорные системы. 1996. Т. 10. № 4. С. 19–27.

Борачук (Жукова) О. В., Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К., Васильев П. П., Пронин С. В., Фокин В. А., Соколов А. В. Исследование механизма принятия ре-

шения в техногенной среде методом фМРТ // Биотехносфера. 2014. № 1–2 (31–32). С. 49–54.

Борачук (Жукова) О. В., Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К., Васильев П. П., Фокин В. А., Соколов А. В. Исследование влияния роли инструкции в задачах распознавания образов «свой-чужой» // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 41–50.

Бугер П. Оптический трактат о градации света / Пер. Н. А. Толстого, П. П. Феофилова. М.: Изд-во АН СССР. 1950. 480 с.

Вавилов С. И. Микроструктура света М.: Изд-во АН СССР, 1950. 198 с.

Вавилов С. И. Глаз и Солнце. М., 1927. Цит. по: М.: Изд-во АН СССР, 1961. 128 с.

Вариационные принципы механики: Сб. статей / Под ред. Л. С. Полака. М.: Физматгиз, 1959. 932 с.

Васильев В. Н., Тибилов А. С. Сравнение абсолютной чувствительности адаптированного к темноте глаза и глаза, оснащенного камерой на основе матрицы ПЗС с умножением электронов // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 3 (в печати).

Вахрамеева О. А., Шелепин Ю. Е. Мезенцев А. Ю., Пронин С. В. Изучение восприятия неполных контурных изображений различного размера // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2008. Т. 94. № 10. С. 1158–1169.

Величкова Р. А., Василев А. Г. Удлинение времени реакции при коротких предпериодах: об участии сенсорных факторов в его возникновении // Доклады Болгарской академии наук. 1976. Т. 29. № 2.

Вилкаускас И. В., Логунова Е. В. Метод обработки изображений для получения априорных оценок направленности и силы их эмоционального влияния на человека // Биотехносфера. 2014. № 1–2. С. 58–64.

Волков В. В., Горбань А. И., Джалиашвили О. А. Клиническая визо- и рефрактометрия. Л.: Медицина, 1976. 215 с.

Волков В. В., Колесникова Л. Н., Левкович Ю. И., Мяло Н. М., Шелепин Ю. Е. Методы визоконтрастометрии // Физиология человека. 1983. Т. 9. № 6. С. 1030–1035.

Волков В. В., Колесникова Л. Н., Шелепин Ю. Е. Методы клинической визоконтрастометрии // Вестник офтальмологии. 1983 а. № 3. С. 59–61.

Волков В. В., Колесникова Л. Н., Шелепин Ю. Е. Частотно-контрастные характеристики и острота зрения в офтальмологической практике // Офтальмологический журнал. 1983 б. № 3. С. 142–151.

Волков В. В., Макулов В. Б., Колесникова Л. Н., Паук В. Н., Шелепин Ю. Е. Новые буквенные тесты для измерения остроты зрения // Офтальмологический журнал. 1987. № 5. С. 294–296.

Волков В. В., Шелепин Ю. Е., Макулов В. Б. Пособие по визоконтрастопериметрии: методические рекомендации и атлас тестовых изображений. М.: Изд. Главного военно-медицинского управления МО СССР, 1988.

Гассовский Л. Н., Никольская Н. А. Движения глаза в процессе непрерывной фиксации точки // Труды ГОИ. 1941. Т. 15. Вып. 112–120.

Гершуни Г. В. Изучение субсенсорных реакций при деятельности органов чувств // Физиологический журнал СССР. 1947. Т. 33. № 4. С. 393–412.

Гласман К. Ф., Букина А. В., Логунов А. Н., Покопцева М. Н., Шурбелев П. А. Оценка качества изображения при видеокомпрессии // Техника кино и телевидения. 1999. № 8. С. 48–51.

Гласман К. Ф., Логунов А. Н., Перегудов А. Ф., Лычаков В. Н. Объективная оценка артефактов видеокомпрессии // Техника кино и телевидения. 2000. № 2.

Гласман К. Ф., Логунов А. Н. Оценка заметности артефактов видеокомпрессии // Техника кино и телевидения. 2003 а. № 4.

Гласман К. Ф., Логунов А. Н., Третьяк С. А. Элементы тестовых таблиц для измерения качества изображения в системах с компрессией MPEG-2 // Техника кино и телевидения. 2003. № 10.

Глезер В. Д. Функциональные единицы фовеального зрения // Физиологический журнал СССР имени И. М. Сеченова. 1960. Т. 46. С. 1325–1335.

Глезер В. Д. Механизмы опознания зрительных образов. Л.: Наука, 1966. 203 с.

Глезер В. Д. Кусочный Фурье-анализ изображений и роль затылочной, височной и теменной коры в зрительном восприятии // Физиологический журнал СССР. 1978. Т. 64. № 2. С. 1719–1730.

Глезер В. Д. Зрение и мышление. Л.: Наука, 1993. 284 с.

Глезер В. Д., Цуккерман И. И. Информация и зрение. М. — Л.: Из-во АН СССР, 1961. 182 с.

Глезер В. Д., Подвигин Н. Ф., Леушина Л. И., Невская А. А. Зрительное опознание и его нейрофизиологические механизмы. Л.: Наука, 1975. 271 с.

Гнездицкий В. В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). М.: МЕД-пресс-информ, 2004. 648 с.

Говардовский В. В. Биофизика фоторецепции (механизмы фототрансдукции в фоторецепторах позвоночных) // Биофизика сенсорных систем / Под ред. В. В. Самойлова. СПб.: ИнформМед, 2007. Гл. 2.

Головин С. С. Клиническая офтальмология. М. — Л.: Госиздат, 1923.

Головин С. С. Русские изогностические таблицы для исследования остроты зрения. М. — Л.: Госиздат, 1925.

Головин С. С., Сивцев Д. А. Таблицы для определения остроты зрения. М. — Л.: Госиздат, 1926.

Горбов Ф. Д., Лебедев В. И. Психологические аспекты труда операторов. М.: Медицина, 1975.

Горбов Ф. Д., Лебедев В. И. Психоневрологические аспекты труда операторов. М.: Наука, 1976.

Горбов Ф. Д. Я — второе Я. М.: Психолого-социальный институт — Воронеж: НПО «МОДЭК», 2000. 224 с.

Дарвин Ч. Выражение душевных волнений / Пер. М. Филиппова. Издание СПб., 1896.

Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора // Иллюстрированное собрание сочинений в 8 т. М.: Издание Ю. Лепковского, 1908. Т. 1.

Дарвин Ч. О выражении душевных движений у человека и животных // Иллюстрированное собрание сочинений в 8 т. М.: Издание Ю. Лепковского, 1908. Т. 3.

Дарвин Ч. О выражении ощущений у человека и животных / Пер., под ред. А. О. Ковалевского. М. — Л.: Госиздат, 1927.

Данько Р. Е., Красильников Н. Н., Кузнецов А. В., Литвинцев С. В., Малахов Ю. К., Шелепин Ю. Е. Коэффициент эффективности зрительного восприятия у здоровых наблюдателей и у больных неврозами // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 65–67.

Дешкович А. А., Красильников Н. Н., Меркульев А. В., Муравьева С. В., Одинак М. М., Пронин С. В., Шелепин Ю. Е. Голлин-тест // Современные подходы к диагностике и лечению нервных и психических заболеваний. СПб.: Изд-во Главного военно-медицинского управления МО РФ и Военно-медицинской академии, 2000. 587 с.

Дешкович А. А., Меркульев А. В., Чихман В. Н., Шелепин Ю. Е. Восприятие фрагментированных изображений и диагностика поражений зрительной системы // Труды конференции «Боевые повреждения органа зрения». СПб.: Изд-во ВМА, 2003. С. 161.

Дешкович А. А., Шелепин Ю. Е. Измерение уровня внутреннего шума зрительной системы при ее поражениях (новый метод в нейроофтальмологии) // Труды конференции «Боевые повреждения органа зрения». СПб.: Изд-во Главного военно-медицинского управления МО РФ и Военно-медицинской академии, 2000. С. 84–85.

Жукова О. В., Малахова Е. Ю. Разработка искусственной нейронной сети глубокого обучения при распознавании лиц в условиях неопределенности // Санкт-Петербургский научный форум, посвященный 100-летию Физиологического общества имени И. П. Павлова: материалы форума. СПб.: Ин-т физиологии имени И. П. Павлова РАН, Изд-во «ЛЕМА», 2017.

Жукова О. В., Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К., Васильев П. П., Фокин В. А., Соколов А. В. МРТ-исследование восприятия изображений лиц в различных условиях вероятности повтора стимулов // Петербургский психологический журнал. 2015. № 13. С. 1–18.

Зак П. П., Островский М. А. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков // Энергосовет. 2012. № 5 (24). С. 39–42.

Зворыкин В. К. Телевидение при помощи катодных трубок. М.: Энергоиздат, 1933. 36 с.

Иваницкий А. М., Стрелец В. Б., Корсаков И. А. Информационные процессы мозга и психическая деятельность. М.: Наука, 1984. 199 с.

Иванова Т. В. Введение в прикладную и компьютерную оптику: конспект лекций. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.

Каменкович В. М., Шевелев И. А. Латентные периоды опознания человеком геометрических фигур при разной степени маскировки их сторон и углов // Физиология человека. 2006. Т. 32. № 2. С. 5–9.

Кануников И. Е., Фомичева Д. А. Реакция мозга человека на изображение лиц, предъявленных в эмоционально отрицательном контексте // Лицо человека в науке, искусстве и практике. М.: Когито-Центр, 2015. С. 415–426.

Каплан А. Я. Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозг-машинных интерфейсов в неврологической реабилитации // Физиология человека. 2016. Т. 42 № 1. С. 118–127.

Карпов Б. А., Штром В. Ф., Чихман В. Н. Машинный анализ результатов регистрации движений глаз в процессе чтения // Российский физиологический журнал. 1993. Т. 79. № 10. С. 92–98.

Карпов Б. А., Штром В. Ф., Чихман В. Н. Программы анализа глазодвигательной активности в процессе чтения // Растройства речи. Клинические проявления и методы коррекции: сб. научных трудов / Под ред. А. А. Ланцова. СПб., 1994. С. 14–19.

Кемпбелл Ф. В., Шелепин Ю. Е. Возможности фовеолы в различении объектов // Сенсорные системы. 1990. Т. 4. № 2. С. 181–185.

Кожевников В. А. Анализатор энцефалограмм. Авторское свидетельство № 1040946 // Бюллетень изобретений. 1956. Т. 8. № 18.

Кожевников В. А., Мещерский Р. М. Современные методы анализа электроэнцефалограммы. М.: Медицина, 1963. 328 с.

Коскин С. А., Бойко Э. В., Соболев А. Ф., Шелепин Ю. Е. Механизмы распознавания контурных «исчезающих» оптотипов // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2005. Т. 91. № 10. С. 1080–1090.

Коскин С. А., Шелепин Ю. Е., Макулов В. Б., Паук В. Н., Павлов Н. Н. Условия различения оптотипов с заданными пространственно-частотными характеристиками // Сенсорные системы. 1990. Т. 4. № 1. С. 79–83.

Коскин С. А., Хлебников В. В., Шелепин Ю. Е. Измерение остроты зрения в клинической практике // Офтальмохирургия и терапия. 2002. Т. 2. № 3. С. 40–43.

Костандов Э. А. Функциональная асимметрия полушарий мозга и неосознаваемое восприятие. М.: Наука, 1983.

Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи // Всесоюзный энергетический комитет: материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933; URL: https://ufn.ru/ru/articles/2006/7/h (24.02.2006).

Кочетков В. В., Скотникова И. Г. Индивидуально-психологические проблемы принятия решений. М.: Наука, 1993. 144 с.

Кравков С. В. Глаз и его работа. 2-е изд. М. — Л.: Медгиз, 1936. 353 с.

Кравков С. В. Глаз и его работа. 4-е изд. М. — Л.: Медгиз, 1950. 531 с.

Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 247 с.

Красильников Н. Н. Математическая модель темновой адаптации в зрительной системе человека // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 11. С. 38–44.

Красильников Н. Н. Цифровая обработка изображений. М.: Вузовская книга, 2001. 320 с.

Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.

Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Исследование коэффициента эффективности зрительной системы человека в пороговых условиях наблюдения динамических изображений // Автометрия. 2003. Т. 39. № 4. С. 21–30.

Красильников Н. Н., Красильникова О. И., Шелепин Ю. Е. Модель формирования частотно-контрастной характеристики зрительной системы в зависимости от освещенности сетчатки // Сенсорные системы. 1997. Т. 11. № 3. С. 333–339.

Красильников Н. Н., Красильникова О. И., Шелепин Ю. Е. Экспериментальное исследование согласованной пространственной фильтрации в зрительной системе человека при наблюдении чисто хроматических изображений // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 22–25.

Красильников Н. Н., Красильникова О. И., Шелепин Ю. Е. Исследование эффективности зрительной системы человека при опознавании статических изображений // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 6. С. 27–34.

Красильников Н. Н., Красильникова О. И., Шелепин Ю. Е. Исследование эффективности зрительной системы человека при опознавании динамических изображений // Физиология человека. 2003. Т. 29. № 2. С. 5–10.

Красильников Н. Н., Мироненко Е. П. Исследования восприятия погрешностей формы при наблюдении 3D-объектов // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 5. С. 18–23.

Красильников Н. Н., Мироненко Е. П., Красильникова О. И. Коэффициент эффективности зрительной системы человека при произвольных углах наблюдения трехмерных объектов // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 10. С. 63–68.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Маскировка как результат согласованной фильтрации в зрительной системе человека // Физиология человека. 1996 а. Т. 22. № 5. С. 99–103.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Частотно-контрастные характеристики при наличии помех // Физиология человека. 1996 б. Т. 22. № 4. С. 33–38.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е. Функциональная модель зрения // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 72–82.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Фильтрация в зрительной системе человека в условиях порогового наблюдения // Оптический журнал. 1999 а. Т. 66. № 1. С. 5–14.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Применение принципов оптимального наблюдателя при моделировании зрительной системы человека // Оптический журнал. 1999 б. Т. 66. № 9. С. 17–24.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Математическая модель цветовой константности зрительной системы человека // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 5. С. 38–44.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Исследование эффективности зрительной системы человека при опознавании движущихся объектов // Физиология человека. 2003 а. Т. 29. № 4. С. 22–30.

Красильников Н. Н., Шелепин Ю. Е., Красильникова О. И. Моделирование механизма быстрой адаптации зрительной системы к изменению освещенности наблюдаемой сцены // Оптический журнал. 2003 б. Т. 70. № 6. С. 33–38.

Лавров В. В., Рудинский А. В. Распознавание фрагментарных изображений // Сенсорные системы. 2004. Т. 18. № 4. С. 317–324.

Лазарев А. Н., Николаев А. Г., Хрунов Е. В. Оптические исследования в космосе. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 256 с.

Ламминпия А. М., Вахрамеева О. А., Райт Д. В., Пронин С. В., Шелепин Ю. Е. Влияние вейвлетной фильтрации изображений текстов на характеристики движений глаз при чтении // Сенсорные системы. 2013. Т. 27. № 1. С. 3–9.

Ламминпия А. М., Защиринская О. В., Шелепин Ю. Е. Изучение глазодвигательных реакций при чтении и понимании сказок // Петербургский психологический журнал. 2014. № 8.

Ламминпия А. М., Защиринская О. В., Шелепин Ю. Е. Психофизиологический анализ процессов чтения и понимания текстов // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 2. С. 23–28.

Ламминпия А. М., Моисеенко Г. А., Вахрамеева О. А., Сухинин М. В., Шелепин Ю. Е. Изучение связи характеристик движений глаз с геометрией фовеа // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 4. С. 32–37.

Лебедев Д. С., Цуккерман И. И. Телевидение и теория информации. М. — Л.: Энергия, 1965.

Леонов Ю. П. Теория статистических решений и психофизика. М.: Наука, 1977. 233 с.

Липс Г. Ф. Основы психофизики / Пер. Г. А. Котляра. СПб.: Изд-во Поповой, 1903.

Логунова Е. В., Пронин С. В., Шелепин Ю. Е. Моделирование работы пространственно-частотных фильтров при восприятии сложных динамических сцен // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 11.

Логунова Е. В., Шелепин Ю. Е., Шабалина Н. А., Бритиков А. А., Пронин С. В. Изучение экологической безопасности визуальной среды // Биотехносфера. 2014. № 1–2 (31–32). С. 36–41.

Луизов А. В. Инерция зрения. М.: Оборонгиз, 1961. 380 с.

Лукошкова Е. В., Хаютин В. М. Колебания частоты сердцебиений: спектральный анализ // Вестник аритмологии. 2002. № 26. С. 10–21.

Луцив В. Р. Объектно-независимый подход к структурному анализу изображений: Дис. ... д-ра техн. наук // Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. СПб., 2011. 318 с.

Макашова Н. В., Ерохина Е. В. Частотно-контрастная характеристика глаза и критическая частота слияния мельканий (КЧСМ) у больных ретробульбарным невритом // Межобластная конференция офтальмологов. Псков, 1981. Т. 2. С. 233–234.

Малахова Е. Ю. Моделирование и анализ сверточных нейронных сетей для задачи распознавания текста на естественных изображениях // Санкт-Петербургский научный форум, посвященный 100-летию Физиологического общества имени И. П. Павлова, Санкт-Петербург (17–19 апреля 2017): материалы форума. СПб.: Ин-т физиологии имени И. П. Павлова РАН, изд-во «Лема», 2017.

Малахова Е. Ю., Шелепин Е. Ю., Малашин Р. О. Применение искусственных нейронных сетей, учитывающих временную динамику, для анализа движения глаз без специального оборудования // Оптический журнал. 2018. Т. 85. Вып 3 (в печати).

Малахова Е. Ю., Жукова О. В., Шелепин Ю. Е. Джоконда — неопределенность восприятия улыбки человеком и искусственной нейронной сетью // Технологическая перспектива в рамках Евразийского пространства: новые рынки и точки экономического роста. СПб., 2017.

Малахова Е. Ю., Ламминпия А. М., Шелепин Ю. Е. Влияние частеречного состава текста на характеристики движений глаз при естественном чтении // Экспериментальная психология. 2016. Т. 9. № 4. С. 18–32.

Марр Д. Зрение. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.

Мах Э. Познание и заблуждение. Очерки по психологии исследования / Пер. с нем. Г. Котляра, под ред. Н. Ланге. М.: Изд-во С. Скирмунта, 1912 [1905].

Мах Э. Механика. Историко-критический очерк ее развития / Пер. с нем. Г. Котляра, под ред. Н. Гезехуса. СПб., 1909 [1883].

Меркульев А. В., Пронин С. В., Семенов Л. А., Фореман Н., Чихман В. Н., Шелепин Ю. Е. Пороги отношения сигнал / шум при восприятии фрагментированных изображений // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 11. С. 1348–1355.

Меркульев А. В., Шелепин Ю. Е., Чихман В. Н., Пронин С. В., Фореман Н. Оптико-геометрические характеристики и пороги восприятия фрагментированных контурных фигур // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2003. Т. 89. № 6. С. 731–737.

Меркульева Н. С., Макаров Ф. Н. Влияние кратковременной и длительной стимуляции мелькающим светом на систему цитохромоксидазных модулей слоя IV первичной зрительной коры котят // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2008. Т. 94 (5). С. 557–565 [Merkul'eva N. S., Makarov F. N. Effects of transient and prolonged flashing light stimulation on the cytochrome oxidase module system in layer IV of the primary visual cortex of kittens. Neuroscience and Behavioral Physiology. 2009. Vol. 39 (5). P. 449–455].

Меркульева Н. С., Михалкин А. А., Никитина Н. И., Макаров Ф. Н. Онтогенетическое развитие связей первичной зрительной коры с центром анализа движений: роль зрительного окружения // Морфология. 2011. Т. 140 (6). С. 24–31 [Merkulieva N. S., Mikhalkin A. A., Nikitina N. I., Makarov F. N. Development of the Connections of the Primary Visual Cortex with the Movement Analysis Center: the Role of the Visual Environment. Neuroscience and Behavioral Physiology. 2012. Vol. 42 (9). P. 1001–1007].

Меркульева Н. С., Иванов Р. С., Бондарь И. В. Развитие систем функциональных модулей зрительной коры котят в условиях бинокулярной ритмической световой стимуляции разной длительности // Журнал высшей нервной деятельности имени И. П. Павлова. 2015. Т. 65 (1). С. 1–5.

Меркульева Н. С., Бугрова В. С., Бондарь И. В. Развитие межмодульных взаимодействий в поле 18 у котят, выросших в разных условиях зрительного окружения: ориентационные модули // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2016. Т. 102. Вып. 10. С. 1156–1164.

Методические указания о единообразии при исследовании остроты зрения / Министерство здравоохранения СССР, НИИ глазных болезней имени Гельмгольца. М., 1963.

Мирошников М. М. Иконика // Труды ГОИ. 1978. Вып. 178; 1984. Вып. 191; 1987. Вып. 198; 1988. Вып. 204; 1991. Вып. 207; 1992. Вып. 213.

Мирошников М. М. Иконика, обработка и восприятие изображения // Труды ГОИ. 1982. Т. 51. Вып. 185. С. 3–6.

Мирошников М. М. Иконика в физиологии и медицине. Л.: Наука, 1987.

Мирошников М. М., Нестерук В. Ф., Порфирьева Н. Н. Иконика и ее основные задачи // Оптико-механическая промышленность. 1977. № 6. С. 3–7.

Мирошников М. М., Нестерук В. Ф. Дальнейшее развитие методологических основ иконики // Труды ГОИ. 1987. Т. 64. Вып. 198. С. 5–11.

Мищенко М. П. Опыты мелософии. О непройденных путях музыкальной науки. СПб.: Изд-во имени Н. И. Новикова, Gallina Scripsit, 2014. 532 с.

Моисеенко Г. А., Вершинина Е. А., Пронин С. В., Чихман В. Н., Михайлова Е. С., Шелепин Ю. Е. Латентные периоды компонентов вызванных потенциалов в задачах классификации изображений, подвергнутых вейвлетной фильтрации // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 6. С. 37–48.

Моисеенко Г. А., Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К., Пронин С. В., Чихман В. Н., Вахрамеева О. А. Классификация и распознавание изображений живой и неживой природы // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 53–64.

Московченко Л. В., Тупиков В. А., Лысенко Э. Л. Концепция построения перспективных систем оптико-электронной пассивной локации для надводных кораблей // Национальная оборона. 2012. № 9. С. 60–61.

Муравьева С. В., Шелепин Ю. Е., Дешкович А. А. Зрительные вызванные потенциалы человека на шахматный паттерн разного контраста в условиях помехи при рассеянном склерозе // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 4. С. 463–473.

Муравьева С. В., Дешкович А. А., Шелепин Ю. Е. Магно- и парвосистемы человека и избирательные нарушения их работы // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2008. Т. 94. № 6. С. 637–649.

Муравьева С. В., Пронин С. В., Шелепин Ю. Е. Контрастная чувствительность зрительной системы человека // Экспериментальная психология. 2010. Т. 3. № 3. С. 5–20.

Мурыгин К. В. Оптимизация габоровских вейвлет-преобразований для задачи распознавания человека по изображению лица // Искусственный интеллект. 2003. № 4. С. 223–229.

Нестеров В. К., Тибилов А. С., Шелепин Ю. Е. Сравнение характеристик поля зрительных рецепторов и матриц фотоэлектрических приемников при предельно низких освещенностях // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 7. С. 61–69.

Новиков Г. И., Подвигин Н. Ф., Светлова В. Я., Куперман А. М. Исследование ответов нейронов наружного коленчатого тела кошки на движущиеся светлые полосы // Физиологический журнал СССР имени И. М. Сеченова. 1981. Т. 67. № 11. С. 1617–1627.

Ортенберг Ф. С., Трифонов Ю. М. Озон: взгляд из космоса (Космический мониторинг атмосферного озона). М.: Знание, 1990. 64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 9).

Островская М. А. Частотно-контрастная характеристика глаза // Оптико-механическая промышленность. 1969. № 2. С. 51–54.

Островский М. А. Молекулярные механизмы повреждающего действия света на структуры глаза и системы защиты от такого повреждения // Успехи биологической химии. 2005. № 45. С. 173–204.

Островский М. А. Молекулярные механизмы повреждающего действия света на структуры глаза. Клиническая физиология зрения. М.: МБН, 2006. С. 109–127.

Островский М. А. Фотобиологический парадокс зрения // Биофизика сенсорных систем / Под ред. В. О. Самойлова. СПб.: ИнформМед, 2007. Гл. 3.

Островский М. А., Сакина Н. Л., Федорович И. Б., Чеснов В. М. Физики и световая чувствительность глаза // Природа. 2001. № 6. С. 70–77.

Павлов И. П. Двадцатилетний опыт объективного изучения высшей нервной деятельности (поведения) животных. М. — Пг.: Госиздат, 1923. Гл. «Рефлекс цели» [М.: Наука, 1973. С. 214–218].

Павлов Н. Н., Коскин С. А., Шелепин Ю. Е. Влияние пространственной дискретизации и фильтрации элементов изображений на возможность объединения их в образ // Сенсорные системы. 1989. Т. 3. № 4. С. 417–422.

Подвигин Н. Ф., Багаева Т. В., Подвигина Д. Н. Селективная самосинхронизация импульсных потоков в нейронных сетях зрительной системы // Доклады Академии наук. 2005. Т. 400. № 1. С. 1–3.

Подвигин Н. Ф., Багаева Т. В., Подвигина Д. Н., Якимова Е. Г., Иванова Л. Е., Солнушкин С. Д. Новое свойство ориентационно-избирательных нейронов наружного коленчатого тела кошки // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2007. Т. 43. № 6. С. 487–493.

Подвигин Н. Ф., Макаров Ф. Н., Шелепин Ю. Е. Элементы структурно-функциональной организации зрительно-глазодвигательной системы. Л.: Наука, 1986.

Подвигин Н. Ф., Якимова Е. Г., Подвигина Д. Н. Ориентационно-избирательные свойства нейронов наружного коленчатого тела кошки // Вестник КазНУ. Серия биологическая. 2007. № 4 (34). С. 100–103.

Подвигин Н. Ф., Якимова Е. Г., Шереметьева Т. А., Подвигина Д. Н. Нейронный механизм описания формы трехмерных зрительных объектов по их двухмерным ретинальным отображениям // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431. № 2. С. 266–268.

Сельченкова Т. В., Хараузов А. К., Шелепин Ю. Е. Электрофизиологические и психофизические исследования влияния длительности предъявления текстур на пороги распознавания // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2011. Т. 97. № 7. С. 316–329.

Симонов П. В. «Сверхзадача» художника в свете психологии и нейрофизиологии // Психология процессов художественного творчества. Л.: Наука, Станиславский К. С. Собр. Соч. в 8 т. М.: Искусство, 1959

Стефанова Н. Значение признака величины в процессе узнавания зрительных объектов // Исследование принципов переработки информации в зрительной системе. Л.: Наука, 1970.

Стефанова Н. Об инвариантности зрительных образов // Вторая национальная конференция болгарского общества физиологов. София. 1964. Т. 97. С. 19.

Тибилов А. С., Шелепин Ю. Е. Сравнение результатов психофизических и физиологических исследований порога зрительного восприятия // Сенсорные системы. 2013. Т. 27. № 3. С. 271–276.

Толстой Л. Н. Детство, отрочество, юность // Собр. соч. Т. 1. М.: Художественная литература, 1952.

Тонконогий И. М., Цуккерман И. И. Применение изображений, искаженных флуктуациями, для изучения нарушений зрительного гнозиса // Журнал невропатологии и психиатрии имени С. С. Корсакова. 1963. Т. 63. № 2. С. 236–239.

Трифонов М. И., Павлов Н. Н., Шаревич В. Г., Шелепин Ю. Е., Попов А. В. Исследование частотно-контрастной характеристики зрительной системы в условиях помех // Физиология человека. 1990. Т. 16. №. 2. С. 41–45.

Трубецкой Н. С. Цит. по: Основы фонологии / Пер. с нем. А. А. Холодовича; под ред. С. Д. Кацнельсона; послесл. А. А. Реформатского. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960 [Trubetzkoy N. Essai d'une théorie des oppositions phonologiques. Journal de Psychologie. 1936 Vol. 33. P. 5–18; Trubetzkoy N. Grundzuege der Phonologie. In: Travaux du Cercle Linguistique de Prague. 1939].

Филд Д. Согласованные фильтры, вейвлеты и статистика натуральных сцен // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. С. 25–36.

Филин В. А. Видеоэкология. Что для глаза хорошо, а что плохо. М.: Изд-во «Московский университет», МЦ «Видеоэкология». 1997. 312 с.

Филин В. А. Автоматия саккад. М.: Изд-во МГУ, 2002. 240 с.

Фирсов М. Л., Говардовский В. И. Темновой шум зрительных пигментов с различным положением максимума поглощения // Сенсорные системы. 1990. Т. 4. С. 25–34.

Фирсов М. Л., Говардовский В. И. Световая адаптация фоторецепторов: смысл и механизмы // Сенсорные системы. 2001. Т. 15. С. 102–115.

Фокин В. А., Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К., Севостьянов А. В., Труфанов Г. Е., Пронин С. В. Активация областей коры головного мозга человека, активируемых при восприятии упорядоченных и хаотичных изображений // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2007. Т. 9. № 10. С. 1089–1100.

Хараузов А. К., Бойко Э. В., Коскин С. А., Соболев А. Ф., Шелепин Ю. Е. Объективные измерения остроты зрения человека методом зрительных вызванных потенциалов // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2005. Т. 91. № 8. С. 956–969.

Хараузов А. К., Шелепин Ю. Е., Пронин С. В., Сельченкова Т.В., Носков Я. А. Электрофизиологическое исследование механизмов распознавания текстур // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2007. Т. 93. № 1. С. 3–13.

Харкевич А. А. Спектры и анализ. М. — Л.: Гос. изд-во тех.-теор. лит-ры, 1952. 192 с.

Харкевич А. А. Теория информации. Опознание образов // Избранные труды. М.: Наука. 1973. Т. 3.

Холина А. Новая таблица для исследования остроты зрения // Русский офтальмологический журнал. 1930. Т. 10. № 2. С. 42–47.

Цикуленко К. И. О восприятии точки // Русский офтальмологический журнал. 1926. Т. 5. № 1. С. 151–156.

Цикуленко К. И. Острота зрения в свете «гипотезы пигментной призмы» // Русский офтальмологический журнал. 1929. Т. 9. № 2. С. 137–142.

Цикуленко К. И. Модификация колец Landolt'a в связи с влиянием на них иррадиации // Русский офтальмологический журнал. 1927. Т. 6. № 11. С. 1042–1045.

Цуккерман И. И. Электронная оптика в телевидении. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1958; Pergamon Press. New York. 1961.

Цуккерман И. И. Геометрические преобразования и пространственная фильтрация электронных изображений: Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Л.: ЛФТИ АН СССР, 1964.

Цуккерман И. И. Преобразование электронных изображений. Л.: Энергия, 1972.

Цуккерман И. И. Статистическая структура изображений и особенности зрительного восприятия // Переработка информации в зрительной системе. Л.: Наука, 1975.

Цуккерман И. И. О согласованности пространственно-частотных фильтров зрительного анализатора со статистикой изображений // Биофизика. 1978. Т. 23. № 6. С. 1108–1109.

Цуккерман И. И., Шостацкий Н. Н. Анизотропия пространственно-частотной характеристики зрения // Физиология человека. 1978. Т. 4. № 1. С. 17–20.

Черниговская Н. В. Идеи В. Н. Черниговского, важные для интеграции физиологии и клинической неврологии // Успехи физиологических наук. 2001. Т. 32. № 4. С. 82–93.

Черниговская Н. В. О патофизиологических механизмах нейроаллергической реакции при рассеянном склерозе // Журнал невропатологии и психиатрии. 1970. Т. 70. № 8. С. 1150–1155.

Черниговская Н. В., Черниговский В. Н. Эфаптическая передача возбуждения (клинико-физиологические аспекты) // Проблемы общей и клинической физиологии сердечно-сосудистой системы. Киев: Наукова думка, 1976. С. 207–215.

Черниговская Т. В. Чеширская улыбка кота Шредингера: язык и сознание. М.: Языки славянской культуры, 2013.

Черниговская Т. В. От коммуникационных сигналов к языку и мышлению человека: эволюция или революция // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2008 а. Т. 94. № 9. С. 1017–1028.

Черниговская Т. В. Человеческое в человеке: сознание и нейронная сеть // Проблема сознания в философии и науке. М.: ИФ РАН, Канон+, 2008 б.

Черниговская Т. В. Мозг и язык: врожденные модули или обучающаяся сеть? // Мозг. Фундаментальные и прикладные проблемы / Под ред. А. И. Григорьева. М.: Наука, 2010. С. 117–127.

Чихман В. Н., Шелепин Ю. Е., Пронин С. В. Экспериментальное исследование инвариантного восприятия вейвлетных изображений // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 12. С. 50–56.

Чурашов С. В., Шелепин Ю. Е., Павлов Н. Н., Колесникова Л. Н., Данилова М. В. Исследование пространственной структуры фовеальных элементов методом лазерной интерферометрии // Сенсорные системы. 1990. Т. 4. № 1. С. 79–83.

Шамшинова А. М., Волков В. В. Функциональные методы исследования в офтальмологии. М.: Медицина, 2004. 416 с.

Шевелев И. А. Динамика зрительного сенсорного сигнала. М.: Наука, 1971.

Шевелев И. А. Нейроны зрительной коры. Адаптивность и динамика рецептивных полей. М.: Наука, 1984. 205

Шевелев И. А., Шараев Г. А. Динамика ориентационной настройки нейронов зрительной коры кошки // Нейрофизиология. 1981. Т. 13. № 5. С. 451–459.

Шевелев И. А, Каменкович В. М., Лазарева Н. А., Шараев Г. А., Новикова Р. В., Тихомиров А. С. Восприятие неполных фигур и ответы стриарных нейронов на признаки изображений второго порядка // Сб. трудов 18-го съезда Физиологического общества имени И. П. Павлова. Казань, 2001. С. 275–276.

Шевелев И. А., Каменкович В. М., Лазарева Н. А., Новикова Р. В., Тихомиров А. С., Шараев Г. А. Психофизическое и нейрофизиологическое исследование опознания неполных изображений // Сенсорные системы. 2003. Т. 17. № 4. С. 339–346.

Шевелев И. А., Каменкович В. М., Шараев Г. А. Относительное значение линий и углов геометрических фигур для их опознания человеком // Журнал высшей нервной деятельности. 2000. Т. 50. № 3. С. 403.

Шелепин К. Ю., Пронин С. В., Шелепин Ю. Е. Распознавание фрагментированных изображений и возникновение «инсайта» // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 72–80.

Шелепин Ю. Е. К математической интерпретации нейроно-глиальных взаимоотношений // Доклады Академии наук СССР. 1970. Т. 192. № 3. С. 698–701.

Шелепин Ю. Е. О зависимости параметров вызванных потенциалов в стриарной коре кошки от размера изображения // Физиологический журнал СССР имени И. М. Сеченова. 1973 а. Т. 59. № 5. С. 688–695

Шелепин Ю. Е. Локализация областей зрительной коры кошки, дающих инвариантный ответ при изменении размера изображения // Нейрофизиология. 1973 б. Т. 5. № 2. С. 115–121.

Шелепин Ю. Е. Ориентационная избирательность и пространственно-частотные характеристики рецептивных полей нейронов затылочной коры кошки // Нейрофизиология. 1981 а. Т. 13. № 3. С. 227–232.

Шелепин Ю. Е. Фильтрационные свойства рецептивных полей нейронов зрительной коры // Доклады Академии наук СССР. 1981 б. Т. 261. № 6. С. 1506–1509.

Шелепин Ю. Е. Пространственно-частотные характеристики рецептивных полей нейронов латеральной супрасильвиевой области // Нейрофизиология. 1982. Т. 14. № 6. С. 608–614.

Шелепин Ю. Е. Сопоставление топографических и пространственно-частотных характеристик латеральной супрасильвиевой и стриарной областей коры кошки // Нейрофизиология. 1984. Т. 16. № 1. С. 35–41.

Шелепин Ю. Е. Нейрохимия зрительных галлюцинаций и сновидений // Нейрохимия. 1996. Т. 13. № 3. С. 235–236.

Шелепин Ю. Е. Восприятие фрагментированных изображений // Организация и пластичность коры больших полушарий головного мозга. М.: НИИ мозга РАМН, 2001. С. 103.

Шелепин Ю. Е. Пространственно-частотные характеристики и острота зрения человека // Биофизика сенсорных систем / Под ред. В. О. Самойлова. СПб.: ИнформМед, 2007. Гл. 4.

Шелепин Ю. Е. Психофизиология макулы — роль фовеолы, фовеа и периферии макулы в процессе восприятия // Материалы V Всероссийского с международным участием семинара. Круглый стол «Макула». Ростов-на-Дону, 2012 (18–20 мая).

Шелепин Ю. Е. Лицо человека и нейрофизиология невербальных средств коммуникации // Лицо человека как средство общения / Под ред. В. А. Барабанщикова. М.: ИП РАН, 2014.

Шелепин Ю. Е., Бондарко В. М. Острота зрения // Офтальмология — хирургия и терапия. 2002 а. Т. 2. № 1. С. 10–19.

Шелепин Ю. Е., Бондарко В. М. Разрешающая способность и дискретизация изображений в зрительной системе // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2002 б. Т. 88. № 9. С. 1116–1132.

Шелепин Ю. Е., Бондарко В. М., Данилова М. В. Конструкция фовеолы и модель пирамидальной организации зрительной системы // Сенсорные системы. 1995. Т. 9. № 1. С. 87–97.

Шелепин Ю. Е., Борачук (Жукова) О. В., Пронин С. В., Хараузов А. К., Васильев П. П., Фокин В. А. Лицо и невербальные средства коммуникации // Петербургский психологический журнал. 2014. № 9. С. 1–43.

Шелепин Ю. Е., Вахрамеева О. А., Ламминпия А. М., Пронин С. В., Сухинин М. В., Бауэр С. Психофизиология фовеа и перферии — «перископическое и телескопическое зрение // Макула. Ростов-на-Дону, 2012. С. 20–36.

Шелепин Ю. Е., Волков В. В., Макулов В. Б., Колесникова Л. Н., Паук В. Н. Измерение функциональных возможностей зрительной системы человека // Вестник Академии наук СССР. 1987. № 9. С. 63–72.

Шелепин Ю. Е., Глезер В. Д., Бондарко В. М., Павловская М. Б. Пространственное зрение // Физиология зрения / Под ред. А. Л. Бызова. М.: Наука, 1992. С. 528–586.

Шелепин Ю. Е., Колесникова Л. Н., Левкович Ю. И. Визоконтрастометрия (измерение модуляционных передаточных функций зрительной системы). Л.: Наука, 1985. 105 с.

Шелепин Ю. Е., Красильников Н. Н. Принцип наименьшего действия, физиология зрения и условнорефлекторная теория // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2003. Т. 89. № 6. С. 725–730.

Шелепин Ю. Е., Макулов В. Б., Красильников Н. Н., Чихман В. Н., Пронин С. В., Даниличев В. Ф., Коскин С. А. Иконика и методы оценки функциональных возможностей зрительной системы // Сенсорные системы. 1998. Т. 12. № 3. С. 319–328.

Шелепин Ю. Е., Макулов В. Б., Паук В. Н. Новые оптотипы для офтальмоэргономики // Материалы симпозиума «Офтальмоэргономика операторской деятельности». Л.: ВМА, 1986.

Шелепин Ю.Е., Подвигин Н. Ф. Пространственно-временные искажения восприятия движущихся изображений // Физиологический журнал СССР. Т. 64. № 12. С. 1753–1755.

Шелепин Ю. Е., Рудой И. С. Метод наркопсихотерапии больных алкоголизмом // Новые подходы к диагностике и лечению алкоголизма. СПб., 1997. С. 51–53.

Шелепин Ю. Е., Фокин В. А, Мееньшикова С. В., Борачук О. В., Коскин С. А., Соколов В. А, Пронин С. В., Хараузов А. К., Васильев П. П., Вахрамеева О. А. Методы иконики и методы картирования мозга в оценке функционального состояния зрительной системы // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 2. С. 61–75.

Шелепин Ю. Е., Фокин В. А., Хараузов А. К., Пронин С. В., Чихман В. Н. Локализация центра принятия решений при восприятии формы зрительных стимулов // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 6. С. 835–837.

Шелепин Ю. Е., Фокин В. А., Хараузов А. К., Фореман Н., Пронин С. В., Вахрамеева О. А., Чихман В. Н. Локализация методами нейроиконики механизмов принятия решений об упорядоченности текстур // Оптический журнал. 2011. Т. 78. С. 57–69.

Шелепин Ю. Е., Фокин В. А., Хараузов А. К., Форемеан Н., Пронин С. В., Вахрамеева О. А., Чихман В. Н. Локализация оппонентных механизмов принятия решений во фронтальной коре // Пятая международная конференция по когнитивной науке: тезисы докладов. В 2 т. Калининград, 2012. Т. 2. С. 841–842.

Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К. Электрофизиологические методы определения психофизических порогов восприятия в работах В. А. Кожевникова // Идеи и методы экспериментального изучения речи (памяти проф. Кожевникова В. А. и проф. Чистович Л. А.): сб. статей. СПб: СПбГУ, 2008. С. 203–214.

Шелепин Ю. Е., Хараузов А. К., Пронин С. В., Красильников Н. Н. Электрофизиологические исследования пространственного зрения в условиях помехи // Физиология человека. 1999. Т. 25. № 1. С. 33–43.

Шелепин Ю. Е., Чихман А. В., Чихман В. Н. Информативные признаки в верньерных стимулах — сдвиг или ориентация? // Сенсорные системы. 1998. Т. 12. № 2. С. 211–220.

Шелепин Ю. Е., Чихман В. Н., Вахрамеева О. А., Пронин С. В., Фореман Н., Пэсмор П. Инвариантность зрительного восприятия // Экспериментальная психология. 2008. Т. 1 № 1. С. 7–33.

Шелепин Ю. Е., Чихман В. Н., Пронин С. В., Фореман Н., Подвигина Д. Н. Локальный и глобальный анализ в зрительной системе // Сборник симпозиума «От детектора признака к единому зрительному образу». М., 2012. С. 119–120.

Шелепин Ю. Е., Чихман В. Н., Фореман Н. Анализ исследований восприятия фрагментированных изображений: целостное восприятие и восприятие по локальным признакам // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2008. Т. 94. № 7. С. 758–776.

Шелепин Ю. Е., Чихман В. Н., Хараузов А. К., Бондарко В. М., Вахрамеева О. А. Восприятие фрагментированных изображений // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 8. С. 355.

Шелепин К. Ю., Соколов А. В., Фокин В. А., Васильев П. П., Пронин С. В. Феномен инсайта и цифровая визуализация активности головного мозга человека // Вестник ЮУрГУ. Серия «Психология». 2017. Т. 10. № 4.

Шелепина О. Е. Имена прилагательные со значением цвета в поэзии С. Есенина // Вестник Львовского государственного университета. Серия филологическая. 1966. Вып. 4. С. 29–34.

Шендяпин В. М., Барабанщиков В. А., Скотникова И. Г. Уверенности в решении: моделирование и экспериментальная проверка // Экспериментальная психология. 2010. Т. 3. № 1. С. 30–57.

Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 824 с.

Шепелева И. П. Сравнительное изучение морфологии и оптики глаз наземных брюхоногих моллюсков Cochlodina laminata и Perforatella incarnata (Pulmonata: Stylommatophora) с различными световыми предпочтениями // Сенсорные системы. 2006 а. Т. 20. № 1. С. 40–51.

Шепелева И. П. Глаз наземного брюхоногого моллюска Helicigona lapicida (Pulmonata: Stylommatophora) // Сенсорные системы. 2006 б. Т. 20. № 1. С. 52–58.

Якимова. Е. Г., Чижов А. В. Экспериментальные и модельные исследования ориентационной чувствительности нейронов наружного коленчатого тела // Российский физиологический журнал имени И. М. Сеченова. 2013. Т. 99. № 7. С. 841–859.

Ярбус А. Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965.

Aleksander I., Impossible minds: my neurons, my consciousness. Imperial College Press, London. 1996.

Allen P. M., Evans B. J. W., Wilkins A. J. The uses of colour in optometric practice to ameliorate symptoms of visual stress // Optometry in Practice. 2012. Vol. 13. No. 1. P. 1–8.

Allen P. M., Evans B. J. W., Wilkins A. J. Vision and Reading Difficulties Part 1: Specific learning difficulties and vision // Optometry Today. 2009. Vol. 31. P. 30–36.

Allen P. M., Evans B. J. W., Wilkins A. J. Vision and Reading Difficulties Part 5: Clinical protocol and the role of the eye-care practitioner // Optometry Today. 2009. Vol. 22. P. 30–36.

Allison T., Ginter H., Mccarthy G., Nobre A.C., Puce A., Luby M., Spencer D. D. Face recognition in human extrastriate cortex // Journal of Neurophysiology. 1994. Vol. 71. P. 821–825.

Amodio D. M., Frith C. D. Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition // Nature Reviews Neuroscience. 2006. Vol. 7. P. 268–277.

Andrews-Hanna J. R. The Brain´s Default Network and its Adaptive Role in internal Mentation // Neuroscientist. 2011. Vol. 18. No. 3. P. 251–270.

Arditi A., Knoblauch K., Grunwald I. Reading with fixed and variable character pitch // Journal of the Optical Society of America. 1990. Vol. 7. No. 10.

Ashley V., Vuilleumier P., Swick D. Time course and specificity of event-related potentials to emotional expressions // NeuroReport. 2004. Vol. 15. P. 211–216.

Atchison D., Smith G., Waterworth M. Theoretical effect of refractive error and accommodation on longitudinal chromatic aberration of the human eye // Optometry and Visual Science. 1993. Vol. 70. P. 716–722.

Attneave F. Some information aspects of visual perception // Psychological Review. 1954. Vol. 61. P. 183–198.

Attneave F. Symmetry, information and memory for patterns // American Journal of Psychology. 1955. Vol. 68. P. 209–222.

Babenko V., Yavna D., Soloviev A., Miftakhova M. Spatial selectivity of visual mechanisms sensitive to contrast modulation // Journal of Optical Technology. 2011. Vol. 78. No. 12. P. 771–776.

Babkin V. F. Method and apparatus for the realization of two-dimensional discrete cosine transform for an 8×8 image fragment // Patent is pending in the USA. December. 1991.

Babkin V. F., Kasperovich L. V. Fast discrete cosine transform approximation for JPEG image compression // International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns CAIP 1993. Computer Analysis of Images and Patterns. P. 98–104.

Bacon-Mace N., Mace M. J.-M., Fabre-Thorpe M., Thorpe M. J. The time course of visual processing: Backward masking and natural scene categorization // Vision Research. 2005. Vol. 45. P. 1459–1469.

Baylor D. A., Lamb T. D., Yau K. W. Response of retinal rods to single photons // Journal of Physiology (London). 1979. Vol. 288. P. 613–634.

Balconi M., Lucchiari C. Conciousness. emotion and face: An event-related potentials (ERP) study // John Benjamin. 2005.

Barlow H. B. The absolute efficiency of perceptual decision // Philosophical Transactions of the Royal Society, London B. 1980. Vol. 290. P. 71–82.

Barlow H. B. The efficiency of detecting changes of density in random dot patterns // Vision Research. 1978. Vol. 18. P. 637–650.

Barlow H. B. The neurologic of matching filters // Journal of Optical Technology. 1999. Vol. 66. No. 9. P. 776–781 [Барлоу Г. Нейрологика согласованных фильтров // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. С. 9–16].

Barlow H. Summation and inhibition in the frog`s retina // Journal of Physiology (London). 1953. Vol. 119. P. 69–88.

Barlow H. B., Reeves B. C. The versatility and absolute efficiency of detecting mirror symmetry in random dot displays // Vision Research. 1979. Vol. 19. P. 783–793.

Basar E. [et al.] Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes // International Journal of Psychophysiology. 2001. Vol. 39. Issue 2–3. P. 241–248.

Basar E. Brain function and oscillations. Berlin: Springer. 1998.

Bechara A., Damasio A. R. The somatic marker hypothesis: A neural theory of economic decision // Games Economic Behavior. 2005. Vol. 52. P. 336–372.

Bechtereva N. P., Shemyakina N. V., Starchenko M. G., Danko S. G., Medvedev S. V. Error detection mechanisms of the brain: background and prospects // International Journal of Psychophysiology. 2005. Vol. 58. No. 2–3. P. 227–234.

Bell A. J., Sejnowski T. J. An information maximisation approach to blind separation and blind deconvolution // Neural Computation. 1995. Vol. 7. No. 6. P. 1129–1159.

Bentin S., Allison T., Puce A., Perez E., McCarthy G. Electrophysiological studies of face perception in humans // Journal of Cognitive Neuroscience. 1996. Vol. 8 (6). P. 551–565.

Bentley A. M., Deregowski J. B. Pictorial experience as a factor in the recognition of incomplete figures // Applied Cognitive Psychology. 1987. Vol. 1. P. 209–216.

Bernoulli D. Speciment theories novae de mensure sertis // Commentarii Aademiae Sientiarum Imperialis Petropolitananae. 1738. Vol. 5. P. 175–192.

Biederman I. Recognition-by-components: A theory of human understanding // Psychological Review. 1987. Vol. 94. P. 115–147.

Biederman I., Cooper E. E. Evidence for complete translational and reflectional invariance in visual object priming // Perception. 1991. Vol. 20. P. 585–593.

Biederman I., Cooper E.E. Priming contour-deleted images: Evidence for intermediate representations in visual object recognition // Cognitive Psychology. 1991. Vol. 23. P. 393–419.

Blackharta G. C., Klineb J. P. Individual differences in anterior EEG asymmetry between high and low defensive individuals during a rumination/distraction task // Personality and Individual Differences. 2005. Vol. 39. Issue 2. P. 427–437.

Blakemore C., Carpenter R. H. S., Georgeson M. A. Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // Nature. 1970. Vol. 228. P. 37–39.

Blaser E., Eglington L., Carter A. S., Kaldy Z. Pupillometry reveals a mechanism for the Autism Spectrum Disorder (ASD) advantage in visual tasks // Scientific reports. 2014. Vol. 7. No. 4. P. 4301.

Bohm D. The special theory of relativity. Benjamin Inc. New York. 1965 [Бом Д. Специальная теория относительности. М.: Мир, 1967. Гл. «Физика и восприятие. Роль инвариантов в восприятии». С. 239–281].

Bondarko V., Danilova M. V. What spatial frequency do we use to detect the orientation of a Landolt C? // Vision Research. 1997. Vol. 37. P. 2153–2156.

Boulton M., Dontsov A., Ostrovsky M., Jarvis-Evans J., Svistunenko D. Lipofuscin is a photoinducible free radical generator // Journal of Photochemistry and Photobiology. 1993. Vol. 19. No 3. P. 201–204.

Bouman M. A., Van der Velden H. A. The quanta explanation of vision and the brightness impression for various times of observation and visual angles // JOSA. 1948. Vol. 38. No. 3. P. 231–236.

Braddick O., Atkinson J. Development of brain mechanisms for visual global processing and object segmentation. In: C. von Hofsten, K. Rosander (eds.). From action to cognition (Progress in Brain Research. Vol. 164). Amsterdam: Elsevier. 2007 a. P. 151–168.

Braddick O., Wattam-Bell J., Birtles D., Atkinson J., von Hofsten C., Nyström P. High-density VERPs show distinct mechanisms for global form and motion processing in adults and infants // Journal of Vision. 2007 b. Vol. 7 (9).

Braddick O. J., Birtles D., Mills S., Warshafsky J., Wattam-Bell J., Atkinson J. Brain responses to global perceptual coherence // Journal of Vision 2006. Vol. 6. No. 6. P. 426.

Brass M., Schmitt R. M., Spengler S., Gergely G. Investigating action understanding: inferential processes versus action simulation // Current Biology. 2007. Vol. 17. P. 2117–2121.

Bryan T. D., Hedy K., Kevin N. O. A Meta-Analysis of Functional Neuroimaging Studies of Self and Other Judgments Reveals a Spatial Gradient for Mentalizing in Medial Prefrontal Cortex // Journal of Cognitive Neuroscience. 2012. Vol. 24 (8). P. 1742–1752.

Burgess A., Wagner R., Jennings R., Barlow H. Efficiency of human visual signal discrimination // Science. 1981. Vol. 214. P. 93–94.

Burt P., Adelson E. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code // IEEE Transactions on communications. 1983. V. Com-31. No. 4. P. 532–540.

Caelli T. On discriminating visual textures and images // Perception & Psychophysics. 1982. Vol. 31. P. 149–159.

Campanella S., Gaspard C., Debatisse D., Bruyer R., Crommelinck M., Guérit J.M. Discrimination of emotional facial expressions in a visual oddball task: an ERP study // Biological Psychology. 2002. Vol. 59. P. 171–186.

Campbell F. W. The transmission of spatial information through the visual system // Neurosciences. 1974. Boston: MIT press. P. 95–103.

Campbell F. W. The human eye as an optical filter // Proceedings of the IEEE. 1968. Vol. 56. No. 6. P. 1009–1014.

Campbell F. W. The physics of visual perception // Philosophical Transactions of the Royal Society. London. Ser. B. 1980. Vol. 290. No. 1038. P. 5–9.

Campbell F. W., Green D. G. Optical and retinal factors affecting visual resolution // Journal of Physiology. 1965. Vol. 181. No. 3. P. 576–593.

Campbell F. W., Gubisch R. W. Optical quality of the human eye // Journal of Physiology. 1966. Vol. 186. No. 3. P. 558–578.

Campbell F. W., Kulikowski J. J. Orientation selectivity of the human visual system // Journal of Physiology. 1966. Vol. 187. No. 2. P. 437–445.

Campbell F. W., Robson J. G. Application of Fourier Analyses to the Visibility of Gratings // Journal of Physiology (London). 1968. Vol. 197. P. 551–566.

Campbell F. W., Cleland B. G., Cooper G. F., Enroth-Cugell Ch. The angular selectivity o visual cortical cells to moving gratings // Journal of Physiology (London). 1968. Vol. 198. No. 1. P. 237–250.

Campbell F. W., Cooper G. F., Enroth-Cugell Ch. The spatial selectivity of the visual cells of the cat // Journal of Physiology (London). 1969 a. Vol. 203. No. 1. P. 223–235.

Campbell F. W., Cooper G. F., Robson J. G. The spectral selectivity of visual cells of the cat and squirrel monkey // Journal of Physiology (London). 1969 b. Vol. 204. No. 1. P. 120–121.

Campbell F. W., Maffei L. Electrophysiological evidence for the existence of orientation and size detectors in the human visual system // Journal of Physiology. 1970. Vol. 207. P. 635–652.

Campbell F. W., Shelepin Y. E. The mechanics of the foveola and its role in defining an object // Perception. 1989. Vol. 18. No. 4. P. 532.

Campbell F. W., Shelepin Y. E., Tegeder R. W., Pavlov N. N. Psychophysical measurement of the intercone separation and object recognition in the human foveola // Ophthalmic and Physiological Optics. 1992. Vol. 12. No. 1. P. 101–102.

Canessa N., Alemanno F., Riva F., Zani A., Proverbio A. M., Mannara N. [et al.] The Neural Bases of Social Intention Understanding: The Role of Interaction Goals // PLOS ONE. Vol. 7. P. 1–11. URL: http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0042347.

Cantoni V., Petrosino A. Neural Recognition in a Pyramidal Structure // IEEE Transactions on neural networks. 2002. Vol. 13. No. 2. P. 472–480.

Carretie L., Iglesias J. An ERP study on the specificity of facial expression processing // International Journal of Psychophysiology. 1995. Vol. 19. No. 3. P. 183–192.

Cavanagh P. Size and Position Invariance in the Visual System // Perception. 1978. Vol. 7. P. 167–177.

Chandler D. M., Field D. J. Estimates of the Information Content and Dimensionality of Natural Scenes from Proximity Distributions // Journal of the Optical Society of America A. 2007. Vol. 24. Issue 4. P. 922–941.

Chase C., Ashourzadeh A., Kelly C., Monfette S., Kinsey K. Can the magnocellular pathway read? Evidence from studies of colour // Vision Research. 2003. Vol. 43. P. 1211–1222.

Chikhman V. N., Shelepin Y. E., Foreman N., Merkuljev A.V., Krasilnikov N. N. The Gollin test and the optical properties of incomplete figures at threshold // Perception. 2001. Vol. 30 (supplement). P. 89.

Chikhman V., Shelepin Y., Pronin S. Experimental study of invariant perception of wavelet images // Journal of Optical Technology. 2011. Vol. 78 (12). P. 803–807.

Chikhman V., Shelepin Y., Foreman N., Merkuljev A., Pronin S. Incomplete figure perception and invisible masking // Perception. 2006. Vol. 35. No. 11. P. 1441–1457.

Chikhman V., Shelepin Y., Pronin S., Harausov A., Krasilnikov N., Makulov V. Electrophysiological measurements of the natural image distortion // SPIE. 1998. Vol. 3299. P. 510–518.

Chikhman V., Shelepin Y., Pronin S., Lavrov V., Pushkarev Y. Influence of anxiety on recognition of fragmented contour images by human observers // Perception. 2001. Vol. 30 (supplement). P. 88.

Chikhman V. N., Bondarko V. M., Danilova M. V., Goluzina A. G., Shelepin Y. E. Complexity of images: Experimental and computational estimates compared // Perception. 2012. Vol. 41. P. 631–647

Chronicle E. Colour and visual discomfort in migraineurs (E. Chronicle, A. J. Wilkins) // Lancet. 1991. Vol. 338. P. 890.

Clark D. Framing effects exposed. New York: Pearson Education Limited. 2009.
Conty L., N'Diaye K., Tijus C., George N. When eye creates the contact! ERP evidence for early dissociation between direct and averted gaze motion processing // Neuropsychologia. 2007. Vol. 45 (13). P. 3024–203.
Corkin S. Some relationships between global amnesias and the memory impairments in Alzheimer's Disease. In Alzheimer's Disease: A Report of Progress. Corkin S., Davis K., Growdon J., Usdin E., Wurtman R. (eds.) 1982. New York: Raven Press. P. 149–164.
Curcio C. A., Sloan K. R., Kalina R. E. [et al.] Human Photoreceptor Topography // Journal of Comparative Neurology. 1990. Vol. 292. P. 497–523.
Dacey D. M., Petersen M. R. Dendritic field size and morphology of midget and parasol ganglion cells of the human // Proceedings of the National Academy of Sciences. Neurobiology. 1992. Vol. 89. P. 9666–9670.
Dakin S. C., Watt, R. J. Biological «bar codes» in human faces // Journal of Vision. 2009. Vol. 9 (4). P. 1–10.
Damasio A. Category-related recognition defects as a clue to the neural substrates of knowledge // Trends in Neurosciences. 1990. Vol. 13. No. 3. P. 95–98.
De Lange Dzn H. Research into the Dynamic Nature of the Human Fovea–Cortex Systems with Intermittent and Modulated Light (I. Attenuation Characteristics with White and Colored Light) // Journal of the Optical Society of America. 1958. Vol. 48. No. 11. P. 777–784.
De Lange Dzn H. Research into the Dynamic Nature of the Human Fovea–Cortex Systems with Intermittent and Modulated Light (II. Phase Shift in Brightness and Delay in Color Perception) // Journal of the Optical Society of America. 1958. Vol. 48. No. 11. P. 0784–789.
De Lange F. P., Spronk M., Willems R. M., Toni I. and Bekkering H. Complementary systems for understanding action intentions // Current Biology. 2008. Vol. 18. P. 454–457.
De Winter J., Wagemans J. Contour-based object identification and segmentation: Stimuli, norms and data, and software tools // Behavior Research Methods, Instrumentation, & Computers. 2004. Vol. 36. P. 604–624.
Del Cul A., Baillet S., Dehaene S. Brain dynamics underlying the nonlinear threshold for access to consciousness // PlOS Biology. 2007. Vol. 5 (10). P. 2408–2423.
DeSouza J. F., Dukelow S. P., Gati J. S., Menon R. S., Andersen R. A., Vilis T. Eye position signal modulates a human parietal pointing region during memory-guided movements // Journal of Neuroscience. 2000. Vol. 20. P. 5835–5840.
De Valois, De Valois. Spatial vision. New York. Oxford, Oxford University press. 1988.
De Valois R. L., Albrecht D. G., Thorell L. G. Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex // Vision Research. 1982. Vol. 22. P. 545–559.
Di Pellegrino G., Fadiga L., Fogassi L., Gallese V., Rizzolatti G. Understanding motor events: a neurophysiological study // Experimental Brain Research. 1992. Vol. 91. P. 176–180.
DiGiulio D. V., Seidenberg M., O'Leary D. S., Raz N. Procedural and declarative memory: A development study // Brain and Cognition. 1994. Vol. 25. P. 79–91.
Dow B. M., Snyder A. Z., Vautin R. G. Magnification Factor and Receptive Field Size in Foveal Striate Cortex of the Monkey // Experimental Brain Research. 1981. Vol. 44. P. 213–228.

Duke-Elder S., Wibar K. The anatomy of the visual system // System of ophthalmology. 1961. Vol. 2. Henry Kimpton. London.

Duke-Elder S. The Foundation of Ophthalmology. 1962. St. Louis: Mosby.

Duncan R. O., Boynton G. M. Cortical magnification within human primary visual cortex correlates with acuity thresholds // Neuroimage. 2003. Vol. 38. P. 659–671.

Eckhorn R. [et al.] Coherent oscillations: a mechanism of feature linking in the visual cortex? Multiple electrode and correlation analyses in the cat // Biological Cybernetics. 1988. Vol. 60. No. 2. P. 121–130.

Edelman S., Bulthoff H. Orientation Dependence in the recognition of familiar and novel views of 3D objects // Vision Research. 1992. Vol. 32. P. 2385–2400.

Edelman S., Weinshall D. A self-organizing multiple-view representation of 3D objects // Biological Cybernetics. 1991. Vol. 64. P. 209–219.

Ehrenstein W. H., Ehrenstein A. Psychophysical Methods. In: Modern techniques in neurooscience research. U. Windhorst, H. Johansson (eds.). Verlag. Berlin. Heidelberg. New York: Springer. 1999.

Eimer M., Holmes A. An ERP study on the time course of emotional face processing // NeuroReport. 2002. Vol. 13. P. 427–431.

Evans, B. J. W. Allen P., Wilkins A. J. Vision and Reading Difficulties Part 2: Optometric correlates of reading difficulties // Optometry Today. 2009. Vol. 27. P. 30–38.

Ferrari P. F., Gallese V., Rizzolatti G., Fogassi L. Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex // European Journal of Neuroscience. 2003. Vol. 17. No. 8. P. 1703–1714.

Field D. J. Match filters, wavelets and the statistics of natural scenes // Journal of Optical Technology. 1999. Vol. 66 (9). P. 788–796.

Field D. J. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells // Journal of the Optical Society of America. 1987. Vol. 4. P. 2379–2394.

Field D. J. Scale-invariance and self-similar ‘wavelet’ transforms: an analysis of natural scenes and mammalian visual systems. Wavelets, Fractals and Fourier Transforms: New Developments and New Applications. 1993. P. 151–193.

Field D. J. What is the goal of sensory coding? // Neural Computation. 1994. Vol. 6. P. 559–601.

Field D. J., Brady N. Visual sensitivity, blur and the sources of variability in the amplitude spectra of natural scenes // Vision Research. 1997. Vol. 37. P. 3367–3383.

Field D. J., Hayes A., Hess R. F. Contour integration by the human visual system: evidence for a localassociation field // Vision Research. 1993. Vol. 33. P. 173–193.

Field D., Hayes A. Contour integration and the lateral connections of V1 neurons. In: The Visual Neurosciences. L. M. Chalupa, J .S. Werner (eds.). MIT Press. 2004. P. 1069–1079.

Filin V. Videoecology. What is good for the eye and what is bad? Moscow. TASS. 1997.

Fiser J., Biederman I. Size invariance in visual object priming of gray-scale images // Perception. 1995. Vol. 24 (7). P. 741–748.

Fize D., Vanduffel W., Nelissen K., Denys K., Chef d'Hotel C., Faugeras O., Orban G. A. The Retinotopic Organization of Primate Dorsal V4 and Surrounding Areas: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study in Awake Monkeys // Journal of Neuroscience. 2003. Vol. 23 (19). P. 7395–7406.

Fogassi L., Ferrari P. F., Gesierich B., Rozzi S., Chersi F., Rizzolatti G. Parietal lobe: from action organization to intention understanding // Science. 2005. April. Vol. 308 (5722). P. 662–667.

Fokin V., Trufanov G., Sevostyanov A., Shelepin Y., Harauzov A., Pronin S. Occipital-parietal interaction in incomplete pattern discrimination // Perception. 2006. Vol. 25. P. 18–19.

Foreman N. Correlates of performance on the Gollin and Mooney tests of visual closure // Journal of General Psychology. 1991. Vol. 118 (1). P. 13–20.

Foreman N., Hemmings R. The Gollin incomplete figure test: a flexible, computerized version // Perception. 1987. Vol. 16. P. 543–548.

Fraisse P., Piaget J. (eds.) Troite de psychologie experimentale. Presses universitaires de France. [Экспериментальная психология. М.: Прогресс, 1978. Гл. XX].

Fridlund A. J., Cacioppo J. T. Guidelines for human electromyographic research // Psychophysiology. 1986. Vol. 23. No. 5. P. 567–589.

Fries P., Schroder J., Roelfsema P., Singer W., Engel A. Oscillatory neuronal synchronization in primary visual cortex as a correlate of stimulus selection // Journal of neuroscience. 2002. Vol. 22. No. 9. P. 3739–3754.

Fusar-Poli P., Placentino A., Carletti F., Landi P., Allen P. Functional atlas of emotional faces processing: A voxel-based meta-analysis of 105 functional magnetic resonance imaging studies // Journal of Psychiatry & Neuroscience. 2009. Vol. 34. P. 418–432.

Gabor D. Communication theory and physics // Philosophical Magazine. 1950. Vol. 41. P. 1161–1187.

Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G. Action recognition in the premotor cortex // Brain. 1996. Vol. 119. P. 593–609.

Gallese V., Keysers C., Rizzolatti G. A unifying view of the basis of social cognition // Trends in Cognitive Sciences. 2004. Vol. 8. P. 396–403.

Gerbino W., Fantoni C. Visual interpolation is not scale invariant // Vision Research. 2006. Vol. 46 (19). P. 3142–3159.

Ghent L. Perception of overlapping and embedded figures by children of different ages // American Journal of Psychology. 1956. Vol. 69. P. 575–587.

Ghodse H., Taylor D. R., Greaves J. L., Britten A. J., Lynch D. The opiate addiction test: a clinical evaluation of a quick test for physical dependence on opiate drugs // British Journal of Clinical Pharmacology. 1995. Vol. 39 (3). P. 257–259.

Ghosh A., Petkov N. Robustness of shape descriptors to incomplete contour representations // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2005. Vol. 27. No. 11. P. 1793–1804.

Giersch A., Humphreys G. W., Boucart M., Kovacs I. The computation of occluded contours in visual agnosia: Evidence for early computation prior to shape binding and figure-ground coding // Cognitive Neuropsychology. 2000. Vol. 17. P. 731–759.

Gilbert C. D. Microcircuitry of the visual cortex // Annual Review of Neuroscience. 1983. Vol. 6. P. 217–247.

Ginsburg A. Physiological correlates of a model of human visual system // IEEE Processing. 1971. P. 283–290.

Ginsburg A. P. Is the illusory triangl phvsical or imaginary // Nature. 1975. Vol. 257. P. 219–220.

Ginsburg A. P., Evans P. W. Predicting visual illusions from filtered images based upon biological data // Journal of the Optical Society of America. 1979. Vol. 69. P. 1443.

Ginsburg A. Spatial filtering and visual form perception. In: Handbook of Perception and Human Performance. K. Boff (ed.). New York: John Wiley and Sons. 1986. Vol. 34. P. 1–41.

Ginsburg A. The perception of the visual form. Information processing in the visual system. Leningrad. Nauka. 1976. P. 46–51.

Glacino J. T. Disorders of consciousness: differential diagnosis and neuropathologic features // Seminars in Neurology. 1997. Vol. 17. No. 2. P. 105–111.

Gollin E. S. Developmental studies of visual recognition of incomplete objects // Perceptual and Motor Skills. 1960. No. 11. P. 289–298.

Graham D. J., Field D. J. Variations in Intensity Statistics for Representational and Abstract Art, and for Art from the Eastern and Western Hemispheres // Perception. 2008. Vol. 37. P. 1341–1352.

Graham D. J. Global nonlinear compression of natural luminances in painted art (D. J. Graham, D. J. Field). Proceedings of SPIE Conference on Computer Image Analysis in the Study of Art. San Jose, CA. 2008. URL: http://redwood.psych.cornell.edu/papers/SPIE-final.pdf.

Graham D. J., Field D. J. Statistical regularities of art images and natural scenes: Spectra, sparseness and nonlinearitie // Spatial Vision. 2007. Vol. 21. P. 149–164.

Graziano M. S. A., Andersen R. A., Snowden R. J. Tuning of MST neurons to spiral stimuli // Journal of Neuroscience. 1994. Vol. 14. P. 54–67.

Greicius M. D., Menon V. Default-mode activity during a passive sensory task: uncoupled from deactivation but impacting activation // Journal of Cognitive Neuroscience. 2004. Vol. 16. P. 1484–1492.

Gross C. G. Visual Function of Inferotemporal Cortex. In: Handbook of Sensory Physiology. R. Jung (ed.). Berlin. Springer-Verlag. 1973. P. 451–482.

Gross C. G., Sergent J. Face recognition // Current opinion in Neurobiology. 1992. P. 156–161.

Gross C. G. Visual functions of inferotemporal cortex. In: Handbook of Sensory Physiology. R. Jung (ed.). Berlin. Springer. 1972. Vol. 7. Part 3.

Gruber T., Muller M., Keil A. Modulation of induced gamma band responses in a perceptual learning task in the human EEG // Journal of Cognitive Neuroscience. 2002. Vol. 14. P. 732–744.

Hansen T., Gegenfurtner K. Independence of color and luminance edges in natural sciences // Visual Neuroscience. 2009. Vol. 26. P. 35–49.

Harauzov A. K., Shelepin Y. E., Noskov Y. A., Vasilev P. P., Foreman N. P. The time course of pattern discrimination in the human brain // Vision Research. 2016. Vol. 125. P. 55–63.

Haxby J. V., Hoffman E. A., Gobbini M. I. Distributed human neural systems for face perception // Trends in Cognitive Sciences. 2000. Vol. 4. P. 223–233.

Haxby J., Gobbini M. Distributed neural systems for face perception. The Oxford handbook of face perception. A. Calder (ed.). UK: Oxford University Press. 2011. P. 93–110.

Heart Rate Variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. European Heart Journal. 1996. Vol. 17. P. 354–381.

Hebb D. A. Intelligence, brain and the theory of mind // Brain. 1959. June. Vol. 82. P. 260–275.

Hebb D. A. Neuropsychological theory // Psychology: A Study of a Science. New York. 1959.

Hebb D. A. The Organization of Behavior. New York. 1949.

Heerkeren H. R., Marrett S., Bandettini P. A., Ungerleider L. G. A general mechanism for perceptual decisionmaking in the human brain // Nature. 2004. Vol. 431. No. 7010. P. 859–862.

Heerkeren H. R., Marrett S., Ruff D. A., Bandettini P. A., Ungerleider L. G. Involvement of human left dorsolateral prefrontal cortex in perceptual decision making is independent of response modality // Proceedings of the National Academy of Sciences. USA. 2006. Vol. 103 (26). P. 10023–10028.

Heravian S. J., Douthwaite W. A., Jenkins T. C. Acuity predictions from VEP Clinical and Experimental Optometry. 1999. Vol. 82 (6). P. 244–249.

Hess R., Field D. Integration of contours: new insights // Trends in Cognitive Sciences. 1999. Vol. 3. No. 12. P. 480–486.

Hess R., Hayes A., Field D. Contour integration and cortical processing // Journal of Physiology. Paris. 2003. Vol. 97. P. 105–119.

Huang J., Cooper T.G., Satana B., Kaufman D. I., Cao Y. Visual distortion provoked by a stimulus in migraine associated with hyperneuronal activity // Headache. 2003. Vol. 43. P. 664–671.

Huang J., Wilkins A. J., Cao Y. Mechanisms whereby precision spectral filters reduce visual stress: an fMRI study. 10th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping. Budapest. June. 2004. P. 3–17.

Hubel D. H., Wiesel T. N. Integrative action in the cat's lateral geniculate body // Journal of Physiology. 1961. Vol. 155. No. 2. P. 385–398.

Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex // Journal of Physiology. 1968. Vol. 195. P. 215–243.

Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex // Journal of Physiology. 1959. Vol. 148. No. 3. P. 574–591.

Hubel D. H., Wiesel T. N. Uniformity of monkey striate cortex: A parallel relationship between field size, scatter and magnification factor // Journal of Comparative Neurology. 1974. Vol. 158 (3). P. 295–306.

Hubel D., Wiesel T. Clustered intrinsic connections in cat visual cortex // Journal of Neuroscience. 1983. Vol. 3. P. 1116–1133.

Hull A., Wilkins A. J., Baddeley A. Cognitive psychology and the wiring of plugsю In: M. M. Gruneberg, P. E. Morris, R. N. Sykes (eds.). Practical Aspects of Memory: Current Research and Issues. 1988. Vol. 1. Memory in Everyday Life. Chichester: John Wiley. P. 514–518.

Humphries C., Liebenthal E., Binder J. R. Neuroimage. Tonotopic organization of human auditory cortex // Neuroimage. 2010. April. Vol. 50 (3). P. 1202–1211.

Hummel J., Biederman I. Dynamic binding in a neural network for shape recognition // Psychological Review. 1992. Vol. 99. P. 480–517.

Hyvarinen J., Shelepin Y. E. Distribution of visual and somatic functions in the parietal associative area 7 of the monkey // Brain Research. 1979. Vol. 169. P. 561–564.

Iacoboni M. Neural mechanisms of imitation // Current Opinion in Neurobiology. 2005. Vol. 15. P. 632–637.

Iacoboni M., Lieberman M. D., Knowlton B. J., Molnar-Szakacs I., Moritz M., Throop C. J. Watching social interactions produces dorsomedial prefrontal and medial

parietal BOLD fMRI signal increases compared to a resting baseline // Neuroimage. 2004. Vol. 21. P. 1167–1173.

Ishai A. Lets face its a cortical network // Neuroimage. 2008. Vol. 40. P. 415–419.

Ishai A., Haxby J. V., Ungerleider L. G. Visual imagery of famous faces: effects of memory and attention revealed by fMRI // Neuroimage. 2002. Vol. 17. P. 1729–1741.

Jackowski M. M., Sturr J. F., Taub H. A., Turk M. A. Photophobia in patients with traumatic brain injury: uses of light-filtering lenses to enhance contrast sensitivity and reading rate // Neurorehabilitation. 1996. Vol. 6. P. 193–201.

Jacobs C., Finkelstein A., Salesin D. Fast multiresolution image querying. In Proceedings of SIGGRAPH 95. 1995. ACM. New York. P. 2009–2296.

Johnson E. N., Hawken M. J., Shapley R. The orientation selectivity of color-responsive neurons in macaque V1 // Journal of Neuroscience. 2008. Vol. 28. P. 8096–8106.

Johnson J. Analysis of Image Forming Systems. Proceedings of the Image Intensifier Symposium. U.S. Army Engineer Research and Development Laboratory. Ft. Belvoir. (AD 220 160). 1958.

Jones M. R., Boltz M. Dynamic attending and responses to time // Psychological Review. 1989. Vol. 96 (3). P. 459–491.

Joyce C. A., Schyns P. G., Gosselin F., Cottrell G. W., Rossion B. Early selection of diagnostic facial information in the human visual cortex // Vision Research. 2006. Vol. 46. P. 800–813.

Kanizsa G. Organization in Vision. New York: Praeger. 1979.

Kawamura K. Corticocortical fiber connections of the cat cerebrum // Brain Research. 1973. Vol. 51. Parts 1. 1–21; 2. 22–40, 3. 41–60.

Kechedzhy K. E. Rank distributions of words in additive many-step Markov chains and the Zipf law // Physical Review E. 2005. Vol. 72. P. 046138(1)–046138(6).

Kellman P., Spelke E. Perception of partly occluded objects in infancy // Cognitive Psychology. 1983. Vol. 15. No. 4. P. 483–524.

Keuken M. C., Müller-Axt Ch., Langner R., Eickhoff S. B., Forstmann B. U., Neumann J. B. Networks of perceptual decision-making: an fMRI ALE meta-analysis. Frontiers in Human Neuroscience. 2014. June. Vol. 8. Article 445. P. 1–14.

Khalil N. F. Asymmetry of visual function in migraine with aura: correlation with lateralisation of headache and aura // Cephalalgia. 2011. Vol. 31. No. 2. P. 213–221.

Kharauzov A. K., Pronin S. V., Sobolev A. F., Koskin S. A., Boiko E. V., Shelepin Y. E. Objective Measurement of Human Visual Acuity by Visual Evoked Potentials // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2006. Vol. 36. No. 9.

Kinchla R. A. Detecting target elements in multi-element arrays: A confusability model // Perception and Psychophysics. 1974. Vol. 15. P. 149–158.

Kingdom F. A. A., Field D. J., Olmos A. Does spatial invariance result from insensitivity to change? // Journal of Vision. 2008. Vol. 7. No. 14. P. 1–13.

Koffka K. Principles of Gestalt Psychology. New York. 1935.

Kohler W. Gestalt Psychology. New York. 1947.

Kok A. On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity // Psychophysiology. 2001. Vol. 38. P. 557–577.

Konorski J. Integrative Activity of the Brain. Chicago: University of Chicago Press. 1967.

Kosinski R. J. A literature review on Reaction Time. Clemson University. 2006.

Kovacs I., Jules B. A closed curve is much more than an incomplete one: Effect of closure in figure-ground segmentation // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1993. Vol. 90. P. 7495–7497.

Krach S., Kamp-Becker I., Einhäuser W., Sommer J., Frässle S., Jansen A., Rademacher L., Müller-Pinzler L., Gazzola V., Paulus F. M. Evidence from pupillometry and fMRI indicates reduced neural response during vicarious social pain but not physical pain in autism // Human Brain Mapping. 2015. Vol. 36 (11). P. 4730–4744.

Krasil'nikov N. N. Functional model of the visual system // Journal of Optical Technology. 1997. Vol. 64.

Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I., Shelepin Y. E. Perception of achromatic, monochromatic, pure chromatic and chromatic noisy images by real human-observer under threshold conditions. Proceedings of SPIE. Medical Imaging. California. 2000. February.Vol. 3981. P. 113–121.

Krasil'nikov N. N., Shelepin Y. E., Krasil'nikova O. I. The use of the principles of the optimal observer in modelling the human visual system // Journal of Optical Technology. 1999. Vol. 66. P. 782.

Krasilnikova O. I., Krasilnikov N. N., Shelepin Y. E. Objects complexity and visual efficiency // Perception. 2000. Vol. 29 (supplement). P. 23.

Krolak-Salmon P., Fischer C., Vighetto A., Mauguière F. Processing of facial emotional expression: spatio-temporal data as assessed by scalp event-related potentials // European Journal of Neuroscience. 2001. Vol. 13. No. 5. P. 987–994.

Kuffler S. W. Discharge patterns and functional organization of mammalian retina // Journal of Neurophysiology. 1953. Vol. 16. No. 1. P. 37–68.

Kulikowski J. J., Tolhurst D. J. Psychophysical evidence for sustained and transient detectors in human vision // Journal of Physiology. 1973. Vol. 232. P. 149–162.

Kulikowski J. J., Campbell F. W. Effect of Varying Presentation Time on Potential Evoked by Grating Patterns // Vision Research. 1971. Vol. 11 (10).

Kulikowski J. J., Vidyasagar T. R., Guthrie D. M. Hierarchical and parallel processing in primate vision. Chapter 5 in: Higher Order Sensory Processing. D. M. Guthrie (ed.). In: Higher Order Sensory Processing. 1990. Manchester University Press.

Land M. F. Structure of the retinae of the principal eyes of jumping spiders (salticidae: dendryphantinae) in relation to visual optics // Journal of Experimental Biology. 1969. Vol. 51. P. 443–470.

Large E. W., Jones M. R. The dynamics of attending: How people track time-varying events // Psychological Review. 1999. Vol. 106 (1). P. 119–159.

Lazareva O., Wasserman E., Biederman I. The pigeons and humans are more sensitive to nonaccidental than to metric changes in visual objects // Behavioural Processes. 2008. Vol. 77 (2). P. 199–209.

Lee B. B., Pokorny J., Smith V. C., Martin P. R., Valberg A. Luminance and chromatic modulation sensitivity of macaque ganglion cells and human observers // Journal of the Optical Society of America. 1990. Vol. 7. No. 12. P. 2223–2236.

Lee B. B. Receptive field structure in the primate retina // Vision Research. 1996. Vol. 36. P. 631–644.

Lennie P., Krauskopf J., Sclar G. Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque // Journal of Neuroscience. 1990. Vol. 10. P. 649–669.

Leslie K. R., Johnson-Frey S. H., Grafton S. T. Functional imaging of face and hand imitation: towards a motor theory of empathy // Neuroimage. 2002. Vol. 21 (2). P. 601–607.

Lineback P. Observations on the fovea centralis of 2 human and 7 monkey-pairs of eyes // Anatomical Record. 1927. Vol. 35. P. 19

Livingston M. S., Hubel D. H. Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception // Science. 1988. Vol. 240. P. 740–749.

Logunova E. V., Pronin S. V., Shelepin Y. E. Modelling the operation of spatial-frequency filters during the perception of complex dynamic scenes // Journal of Optical Technology. 2015. Vol. 81 (11). P. 665–670.

Logunova E. V., Shelepin Y. E. Study of the role of spatial-frequency filtering of images when evaluating the age and interpreting the emotional expression of faces // Journal of Optical Technology. 2015. Vol. 82 (10). P. 694–699.

Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant key points // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60 (2). P. 91–110.

Lucchinetti C., Bruck W., Parisi J., Scheithauer B., Rodriguez M., Lassman H. Heterogeneity of multiple sclerosis lesions for the pathogenesis of demyelination // Annals of Neurology. 2000. Vol. 47 (6). P. 707–717.

Luck S. J., Woodman G. F., Vogel E. K. Event-related potentiel studies of attentionAnnals of Neurology // Trends in Cognitive Sciences. 2000. Vol. 4. P. 432–440.

Luckiesh M., Moss F. Reading as a visual task. New York. 1944.

Mack J. L., Patterson M. B., Schnell A. H., Whitehouse P. J. Performance of subjects with probable Alzheimer Disease and normal elderly controls on the Gollin Incomplete Pictures Test // Perceptual and Motor Skills. 1993. Vol. 77. P. 951–969.

Makeig S., Westerfield M., Jung T., Seinowski T. Dynamic Brain Sources of Visual Evoked Responses // Science. 2002. Vol. 295. No. 5555. P. 690–694.

Marinkovic K., Halgren E. Human brain potentials related to the emotional expression, repetition and gender of faces // Psychobiology. 1999. Vol. 26. P. 348–356.

Marr D. Analysis of occluding contour // Proceedings of the Royal Society. 1977. Vol. 197. P. 441–475.

Marr D. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information. San Francisco: W. Freeman. 1982.

Martinez-Conde S. Illusion of the Week: The Margaret Thatcher Illusion A Retrospective. April 10. 2013. URL: https://blogs.scientificamerican.com/illusion-chasers/illusion-of-the-week-the-margaret-thatcher-illusion-a-retrospective/

Mathes B., Fahle M. Closure facilitates contour integration // Vision Research. 2007. Vol. 47. P. 818–827.

May K., Hess R. Dynamics of snakes and ladders // Journal of Vision. 2007. Vol. 7. No. 12. P. 1–9.

McCarthy G., Puce A., Gore J. C., Allison T. Face-specific processing in the human fusiform gyrus // Journal of Cognitive Neuroscience. 1999. Vol. 9. P. 604–609.

McCarthy R. A., Warrington E. K. Cognitive Neuropsychology: A Clinical Introduction. San Diego, CA: Academic Press. 1990. Vol. 31. P. 302.

McKendrick A., Badcock D. Contrast-processing dysfunction in both magnocellular and parvocellular pathways in migraineurs with or without aura // Investigative Ophthalmology and Visual Science. 2003. Vol. 44. P. 442–448.

Mehanian C., Steven J. Rak. Bidirectional log-polar mapping for invariant object recognition // SPIE — The International Society for Optical Engineering. 1991. Vo. 1471. P. 200.

Mollon J. D. Correspondence Fixation and perception // Optica acta. 1968. Vol. 15. No. 3. P. 295–297.

Mollon J. D., Pokorny J., Knoblauch K. Normal and Defective Colour Vision. Oxford University Press. 2003.

Mollon J. D., Bowmaker J. K. The spatial arrangement of cones in the primate fovea // Nature. 1992. Vol. 360 (6405). P. 677–679.

Mollon J. D. Balls, bullets, and shot // Perception. 2006. Vol. 35 (supplement). P. 1.

Mooney C. M. Age in the development of closure ability in children // Canadian Journal of Psychology. 1957. Vol. 2. P. 219–226.

Morgan M. J., Mason A. J. S., Baldassi S. Are there separate first-order and second-order mechanisms for orientation discrimination? // Vision Research. 2000. Vol. 40. P. 1751–1763.

Murphy T. M., Finkel L. H. Shape representation by a network of V4-like cells // Neural Networks. 2007. Vol. 20. Issue 8. P. 851–867.

Murray F. S., Szymczyk J. M. Effects of distinctive features on the recognition of incomplete figures // Developmental Psychology. 1978. Vol. 14. P. 356–362.

Naka K. I, Rushton W. A. H. S-potentials from colour units in the retina of fish (Cyprinidae) // Journal of Physiology. 1966 a. Vol. 185. P. 536–555.

Naka K. I., Rushton W. A. H. An attempt to analyse colour reception by electrophysiology // Journal of Physiology. 1966 b. Vol. 185. P. 556–586.

Nichols M. J., Newsome W. T. The neurobiology of cognition // Nature. 1999. Vol. 402 (supplement). P. 35–38.

Nieuwenhuis S., Aston-Jones G., Cohen J. D. Decision Making, the P3, and the Locus Coeruleus–Norepinephrine System // Psychological Bulletin. 2005. Vol. 131 (4). P. 510–532.

Norcia A. M., Tyler C. W. Spatial frequency sweep VEP: visual acuity during the first year of life // Vision Research. 1985. Vol. 25 (10). P. 1399–1408.

Northoff G., Heinzel A., Bermpohl F., Niese R., Pfennig A., Pascual-Leone A., Schlaug G. Reciprocal modulation and attenuation in the prefrontal cortex: an fMRI study on emotional-cognitive interaction // Human Brain Mapping. 2004. Vol. 21. P. 202–212.

Nuske H. J., Vivanti G., Hudry K., Dissanayake C. Pupillometry reveals reduced unconscious emotional reactivity in autism // Biological Psychology. 2014. Vol. 101. P. 24–35.

O'Doherty J., Winston J., Critchley H., Perrett D., Burt D. M. Beauty in a smile: the role of medial orbitofrontal cortex in facial attractiveness // Neuropsychologia. 2003. Vol. 41. P. 147–155.

Ogawa S., Lee T. M., Kay A. R., Tank D. W. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1990. Vol. 87. P. 9868–9872.

Olshausen B. A., Field D. J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images // Nature. 1996. Vol. 381. P. 607–609.

Olshausen B. A., Field D. J. Sparse coding of sensory inputs // Current Opinion in Neurobiology. 2004. Vol. 14. P. 481–487.

Olshausen B. A., Field D. J. Sparse coding with an overcomplete basis set: A strategy employed by V1? // Vision Research. 1997. Vol. 37. P. 3311–3325.

Olshausen B. A., Field D. J. What is the other 85% of V1 doing? In: 23 Problems in Systems Neuroscience. T. J. Sejnowski, L. van Hemmen (eds.). Oxford: Oxford University Press. 2004.

Omtzigt D., Hendriks A., Kolk H. Evidence for magnocellular involvement in the identification of flanked letters // Neuropsychologia. 2000. Vol. 40. P. 1881–1890.

Pareto V. Cours d'économie politique professé a l'université de Lausanne. 1896. Vol. I; 1897. Vol. II.

Patterson M. B., Mack J. L., Schnell A. H. Performance of elderly and young normals on the Gollin Incomplete Pictures Test // Perceptual and Motor Skills. 1999. Vol. 89. P. 663–664.

Perrett D. I., Rolls E. T., Caan W. Visual neurones responsive to faces in the monkey temporal cortex // Experimental Brain Research. 1982. Vol. 47 (3). P. 329–342.

Perrett D. I., Smith P. A., Mistlin A. J., Chitty A. J., Head A. S., Potter D. D., Broennimann R., Milner A. D., Jeeves M. A. Visual analysis of body movements by neurones in the temporal cortex of the macaque monkey: a preliminary report // Behavioural Brain Research. 1985. Vol. 16 (2–3). P. 153–70.

Perry H., Cowey A. The ganglion cell and cone distributions in the monkey retina: implications for central magnification factors // Vision Research. 1985. Vol. 25. No. 12. P. 1795–1810.

Peterzell D., Norcia A. Spatial Frequency Masking with the Sweep-VEP // Vision Research. 1997. Vol. 37. No. 17. P. 2349–2359.

Philiastides M. G., Ratcliff R., Sajda P. Neural representation of task difficulty and decision making during perceptual categorization: a timing diagram // Journal of Neuroscience. 2006. Vol. 35. No. 26. P. 8965–8975.

Pins D., Ffytche D. The neural correlates of conscious vision // Cerebral Cortex. 2003. Vol. 13 (3). P. 461–474.

Pinna B., Shelepin E. Y., Deiana K. Chromatic accentuation in dyslexia: Useful implications for effective assistive technology. "Video and Audio Signal Processing in the context of Neurotechnology". IEEE international symposium, SPCN 2016. P. 34–36. St.-Petersburg, Russia, 2016.

Piotrowski L. N., Campbell F. W. A demonstration of the visual importance and fl exibility of spatial-frequency amplitude and phase // Perception. 1982. Vol. 11. P. 337–346.

Ploran E., Nelson S., Velanova K., Donaldson D., Petersen S., Wheeler M. Evidence Accumulation and the Moment of Recognition: Dissociating Perceptual Recognition Processes Using fMRI // Journal of Neuroscience. 2007. Vol. 27 (44). P. 11912–11924.

Podvigin N. F., Bagaeva T. V., Podvigina D. N., Yakimova E. G., Granstrem M. P. Complex orientation selectivity of neurons in visual system // Homeostasis in health and disease. 2006. Vol. 4. No. 44. P. 184–188.

Podvigin N. F., Bagaeva T. V., Podvigina D. N., Yakimova E. G., Ivanova L. E., Solnushkin S. D. A new property of orientation-selective neurons of the cat lateral geniculate body // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. 2007. December. Vol. 43. Issue 6. P. 579–586.

Podvigin N. F., Yakimova E. G., Sheremetyeva T. A., Podvigina D. N. Neuronal mechanisms of the description of the shapes of three-dimensional visual objects on the basis of their two-dimensional retinal images // Doklady Biological Sciences. 2010. April. Vol. 431. Issue 1. P. 76–78Poggio T., Edelman S. A network that learns to recognize 3D objects // Nature. 1990. Vol. 343. P. 263–266.

Polimeni J. R., Balasubramanian M., Schwartz E. L. Multi-area visuotopic map complexes in macaque striate and extra-striate cortex // Vision research. 2006. October. Vol. 46 (20). P. 3336–3359.

Polyak S. L. The retina. Chicago: University of Chicago Press. 1941.

Poppelreuter W. Die psychischen Scha«digungen durch Kopfschuss im Kriege 1914–1916. Leipzig: Voss. 1917.

Pratt W. K. Digital Image Processing. New York: John Wiley and Sons. 1978 [Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982].

Privitera C. M., Carneya T., Kleina S., Aguilarb M. Analysis of microsaccades and pupil dilation reveals a common decisional origin during visual search // Vision Research. 2014. Vol. 95. P. 43–50.

Rauschecker J. P. Cortical plasticity and music // Annals of the New York Academy of Sciences. 2001. June. Vol. 930. P. 330–336.

Rauschecker J. P., Scott S. K. Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing // Nature Neuroscience. 2009. June. Vol. 12 (6). P. 718–724.

Rayleigh J. Investigations in optics with special reference to the spectroscope // Scientific Papers. Cambridge: Cambridge University Press. 1899. Vol. 1. P. 415–459.

Rayleigh J. On the resolving power of telescopes // Scientific Papers. Cambridge: Cambridge University Press. 1899. Vol. 1. P. 488–490.

Rayleigh J. On the theory of optical images with special reference to the microscope // Scientific Papers. Cambridge: Cambridge University Press. 1912. Vol. 5. P. 118–125.

Reales J. M., Ballesteros S., Garcia E. Visual word identification thresholds for the 260 fragmented words of the Snodgrass and Vanderwart pictures in Spanish // Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 2002. Vol. 34. P. 276–285.

Recommended standard procedures for the clinical measurement and specification of visual acuity. Report of working group 39. Committee on vision. Assembly of Behavioral and Social Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

Regan D. Human brain electrophysiology. Evoked potentials and Evoked magnetic Fields in Science and Medicine. New York. Elsevier. 1989.

Regan D., Maxner C. Orientation-dependent loss of contrast sensitivity for pattern and flicker in multiple sclerosis clin // Visual Science. 1986. Vol. 1 (1). P. 1–23.

Regan D., Silver R., Murray T. J. Visual acuity and contrast sensitivity in multiple sclerosis- hidden visual loss // Brain. 1977. Vol. 100. P. 563–579.

Regan D., Whitlock A., Murray T. J., Beverley K. I. Orientation-specific losses of contrast sensitivity in multiple sclerosis. Investigative ophatlmology // Visual Science. 1980. Vol. 19 (3). P. 324–328.

Rensink R., Enns J. Early completion of occluded objects // Vision Research. 1998. Vol. 38. P. 2489–2505.

Rizzolatti G., Fogassi L., Gallese V. Mirrors in the Mind // Scientific American Band 295. 2006. No. 5. November. P. 30–37.

Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system // Annual Review of Neuroscience. 2004. Vol. 27. P. 169–192.

Rizzolatti G., Sinigaglia C. Further reflections on how we interpret the actions of other // Nature. 2008. Vol. 455. P. 589.

Rizzolatti G., Fogassi L., Gallese V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action // Nature Reviews Neuroscience. 2001. Vol. 2. P. 661–670.

Rochon-Duvigneaud A. Les fonctions des cones et des batonnets indications fournies par la physiologie compare // Annales d'oculist. 1917. Vol. 154. P. 633–648.

Rodriguez E., George N., Lachaux J. P., Martinerie J., Renault B., Varela F. J. Perception's shadow: longdistance synchronization of human brain activity // Nature. 1999. Vol. 397. No. 4.

Rolls E.T., Baylis G. G. Size and contrast have only small effects on the responses to faces of neurons in the cortex of the superior temporal sulcus of the monkey // Experimental Brain Research. 1986. Vol. 65. P. 38–48.

Rosenblum Y. Z., Zak P. P., Ostrovsky M. A., Smolyaninova I. L., Bora E. V., Dyadina U. V., Trofimova N. N., Aliyev A. G. D. Spectral filters in low-vision correction // Ophthalmic and Physiological Optics. 2000. Vol. 20. Issue 4. P. 335–341.

Ross J., Jenkins B., Johnstone J. R. Size constancy fails below half a degree // Nature. 1980. Vol. 283 (5746). P. 473–474.

Rushton W. A. H. Light and dark adaptation // Investigative ophthalmology. 1972. Vol. 11. No. 6. P. 502–517.

Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process // Journal of Services Sciences. 2008 Vol. 1. No. 1. P. 83–98.

Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York. McGraw-Hill. 1980.

Saaty T. L. Theory and Applications of the Analytic Network Process. Pittsburgh. Pennsylvania. 2005.

Saenger P. Space Between Words. The origins of Silents Reading. Stanford University Press. 1997.

Schade O. H. Optical and phothoelecric analog of the eye // Journal of the Optical Society of America. 1956. Vol. 46. No. 9. P. 721–739.

Schluppeck D., Engel S. A. Color opponent neurons in V1: a review and model reconciling results from imaging and single-unit recording // Journal of Vision. 2002. Vol. 2. No. 6. P. 480–492.

Schneider S., Velmans M. Introduction. In: Velmans M., Schneider S. The Blackwell Companion to Consciousness. Wiley. 2008.

Schober H. Informationstheorie in Optik and Fernsehen // Optik. 1956. Vol. 13. P. 350–364.

Schupp H. T., Junghöfer M., Weike A. I., Hamm A. O. The selective processing of briefly presented affective pictures: An ERP analysis // Psychophysiology. 2004. Vol. 41. No. 3. P. 441–449.

Schupp H. T., Ohman A., Junghofer M., Weike A. I., Stockburger J., Hamm A. O. The facilitated processing of threatening faces: an ERP analysis // Emotion. 2004. Vol. 4. P. 189–200.

Schwartz E. L. Cortical mapping and perceptual invariance: a reply to Cavanagh // Vision Research. 1983. Vol. 23 (8). P. 831–835.

Schwartz E. L. Computational anatomy and functional architecture of striate cortex: a spatial mapping approach to perceptual coding // Vision Research. 1980. Vol. 20. P. 645–669.

Schweinberger S. R., Esther C. P., Burton A. M., Kaufmann J. M. Human brain potential correlates of repetition priming in face and name recognition // Neuropsychologia. 2002. Vol. 40. P. 2057–2073.

Senju A., Johnson M. H. Eye contact effect: mechanism and development // Trends in Cognitive Sciences. 2009. Vol. 13 (3). P. 127–134.

Sepeta L., Tsuchiya N., Davies M., Sigman M., Bookheimer S., Dapretto M. Abnormal social reward processing in autism as indexed by pupillary responses to happy faces // Journal of Neurodevelopmental Disorders. 2012. Vol. 4.

Servos P., Olds E., Planetta P., Humphrey G. Recognizing partially visible objects // Vision Research. 2005. Vol. 45. P. 1807–1814.

Shapley R., Hawken M. J. Color in the Cortex: single- and double-opponent cells // Vision Research. 2011. Vol. 51. P. 701–717.

Sheikh H. R., Bovik A. C. Image information and visual quality // IEEE Trans Image Process. 2006. Vol. 15 (2).P. 430–444.

Shelepin Y. E. Differences of the grouping effect of fovea versus parafovea centered targets // Perception. 2005. Vol. 34 (supplement). P. 197–198.

Shelepin Y. E., Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I., Chihman V. N. What Visual Perception Model is Optimal in Terms of Signal-to-Noise Ratio? // Proceedings of SPIE. Medical Imaging. San Diego. California. 2000. No. 3981. P. 161–169.

Shelepin Y. E., Pavlov N. N. Spatial discreteness, image filtration, and Gestalt construction // Perception. 1989. Vol. 12. No. 4 (supplement). P. 537.

Shelepin Y. E., Pronin S. V. The foveola pixel discrimination and information capacity // Perception. 2006. Vol. 35 (supplement). P. 52.

Shelepin Y., Krasilnikov N., Trufanov E., Harauzov A., Pronin S., Fokin V. The Principle of Least Action and Visual Perception // Perception. 2006. Vol. 35. P. 125.

Shelepin Y., Kuvaldina M., Harauzov A., Vakhrameeva O., Pronin S., Yamschinina P. Investigation of the inattentional blindness for dynamic events as a result of saccadic suppression // Perception. 2012 (41 ECVP abstract supplement). P. 229.

Shelepin Y., Vahrameeva O., Harauzov A., Pronin S., Krasilnikov N., Foreman N., Chihman V. The recognition of incomplete contour and half-tone figures // Perception. 2004. Vol. 33 (supplement). P. 85.

Shelepin Y. E., Gilmartin B., Makulov V. B. Astigmatic chart of the contrast sensitivity. Concussion of the brain and spatial-frequency contrast sensitivity // Perception. 1996. Vol. 25 (supplement). P. 10, 80.

Shelepin Y. E. Human brain. Neurothechnology for consumers. Materials the IEEE International Symposium "Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies". June 30 — July 2 2016. St. Petersburg. P. 82.

Shelepin Y. E., Pavlov N. N., Danilova M. V. The spatial organisation of the human fovea mosaic // Perception. 1989. Vol. 12. No. 4. P. 538 (A56).

Shelepin E., Pinna B., Zhukova O., Logunova E., Pronin S. The thresholds of facial expression suffi cient for nonverbal communication. Fechner Day 2016. Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. Moscow, Russia 15–18 August 2016. P. 63.

Shelepin Y., Pronin S., Shoshina I. The art and schizophrenia. Abstract book of World Psychiatric Association Regional Congress "Mental Health, Direction and Challenges". Tbilisi. 2016. P. 6.

Shelepin Y., Shelepin E., Pronin S., Yakimova E. Neurotechnology for recovery of cognitive and motor function from psychosis and psychopathy. Abstract book of World Psychiatric Association Regional Congress «Mental Health, Direction and Challenges». Tbilisi. 2016. P. 74.

Shepard R., Cooper L. Mental images and their transformation. Cambridge. MIT Press. 1983.

Shum D., Jamieson E., Bahr M., Wallace G. Implicit and explicit memory in children with traumatic brain injury // Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology. 1999. Vol. 21. P. 149–158.

Singh M., Fulvio J. Bayesian contour extrapolation: Geometric determinations of good continuation // Vision Research. 2007. Vol. 47. P. 783–798.

Skottun B. C., Freeman R. D. Perceived size of letters depends on inter-letter spacing: a new visual illusion // Vision Research. 1983. Vol. 23. P. 111–112.

Snellen H. Test-Types for the determination of the acuteness of vision. Keming en Zoon. Van deWeijer. Utrecht. Fourth edition. MDCCCLXIII.

Snodgrass J. G., Hirschman E. Dissociations among implicit and explicit memory tasks: The role of stimulus similarity // Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition. 1994. Vol. 20. P. 150–160.

Snodgrass J. G., Poster M. Visual-word recognition thresholds for screen-fragmented names of the Snodgrass and Vanderwart pictures // Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 1992. Vol. 24. P. 1–15.

Snodgrass J. G., Smith B., Feenan K., Corwin J. Fragmenting pictures on the Apple Macintosh computer for experimental and clinical applications // Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 1987. Vol. 19. P. 270–274.

Spitz H. H., Borland M. D. Redundancy in line drawings of familiar objects: effects of age and intelligence // Cognitive Psychology. 1971. Vol. 2. P. 196–205.

Srinivas K. Size and reflection effects in priming: a test of transfer appropriate processing // Memory and Cognition. 1996. Vol. 24. P. 441–452.

Stark H. Application of Optical Fourier Transforms. New York. Academic Press. 1982.

Stefanova N. Effects of the angle of rotation of visual objects on recognitionin a time-deficit situation // Visual information processing. Sofia. 1974. P. 109–114.

Street R. F. A Gestalt Completion Test. New York. Teachers College. Columbia University. 1931.

Sutherland N. S. Outlines of a theory of visual pattern recognition in animals and man // Proceedings of the Royal Society. 1968. Vol. 171. P. 297–317.

Swets J. A., Tanner W. P., Birdsall T. G. Decision processes in perception // Psychological Review. 1961. Vol. 68 (5). P. 301–340.

Sutherland N. S. The representation of three-dimensional objects // Nature. 1979. Vol. 278. P. 395–398.

Sutherland N. S. Theories of shape discrimination in octopus // Nature. 1960. Vol. 186. P. 840.

Tallon-Baudry C., Bertrand O., Delpuech C., Pernier J. Stimulus Specificity of Phase-Locked and Non-Phase-Locked 40 Hz Visual Responses in Human // Journal of Neuroscience. 1996. Vol. 16. No. 13. P. 4240–4249.

Tamietto M., de Gelder B. Neural bases of the non-conscious perception of emotional signals // Nature Reviews Neuroscience AOP. 2010. Vol. 11. P. 697–709.

Tanaka K. Columns for Complex Visual Object Features in the Inferotemporal Cortex: Clustering of Cells with Similar but Slightly Different Stimulus Selectivities // Cerebral Cortex. 2003. Vol. 13. P. 90–99.

Tanaka K., Saito H., Fukada Y., Moriya M. Coding visual images of objects in the inferntemporal cortex of the macaque monkey // Journal of Neurophysiology. 1991. Vol. 66. No. 1. P. 170–89.

Tanaka. J. S. Multifaceted conceptions of fit in structural equation models. In: K. A. Bollen, J. S. Long (eds.). Testing structural equation models. Newbury Park. 1993.

Tanner W. P., Swets J. A. A decision-making theory of visual detection // Psychological Review. 1954. Vol. 61 (6). P. 401–409.

Tarr M., Williams P., Hayward W., Gauthier I. Three-dimensional object recognition is viewpoint dependent // Nature Neuroscience. 1998. Vol. 1. P. 275–277.

Thompson P. Margaret Thatcher: a new illusion // Perception. 1980. Vol. 9. No. 4. P. 483–484.

Thorsten H. Color perception in the intermediate periphery of the visual field (H. Thorsten, L. Pracejus, K. R. Gegenfurtner) // Journal of Vision. 2009. Vol. 9. No. 4. Article 26.

Tsukkerman I. I., Shelepin Y. E. The methods of computer graphics in the neuropsychology. In: «Graphycon-93». SPb. 1993. Vol 1. P. 42–53.

Tsunoda K., Yamane Y., Nishizaki M., Tanifuji M. Complex objects are represented in macaque inferotemporal cortex by the combination of feature columns // Nature Neuroscience. 2001. Vol. 4. No. 8. P. 832–838.

Tversky A., Kahneman D. The Framing of Decisions and the Psychology of Choice // Science. 1981. Vol. 211. No. 4481. P. 453–458.

Tversky T., Geister W., Perry J. Contour grouping: closure effects are explained by good continuation and proximity // Vision Research. 2004. Vol. 44. P. 2769–2777.

Ullman S. Aligning pictorial descriptions: An approach to object recognition // Cognition. 1989. Vol. 32. P. 193–254.

Ullman S. Filling-in the gaps: The shape of subjective contours and a model for their generation // Biological Cybernetics. 1976. Vol. 25. P. 1–6.

Ullman S. High-level Vision. Cambridge. MA:MIT. 1996.

USAF 1951, 3-Bar Resolving Power Test Chart. Military Standard. MIL-STD-150A. Section 5.1.1.7. Resolving Power Target. 1951.

Vakil E., Hoofien D., Blachstein H. Total amount learned versus learning rate of verbal and nonverbal information, in differentiating left- from right-brain-injured patients // Achives of Clinical Neuropsychology. 1992. Vol. 7. P. 111–120.

Van Nes F., Bouman M. Variation of contrast sensitivity with luminance // Journal of Optical Society of America. 1967. Vol. 57. P. 401–406.

Van Overwalle F. Social cognition and the brain: a meta-analysis // Human Brain Mapping. 2009. Vol. 30. P. 829–858.

Van Rullen R., Thorpe S. J. The time course of visual processing: from early perception to decision making // Journal of Cognitive Neuroscience. 2001. Vol. 13 (4). P. 454–461.

Virsu V., Rovamo J. Visual resolution, contrast sensitivity and cortical magnification factor // Experimental Brain Research. 1979. No. 3. P. 475–494.

Vokey J. R., Baker J. G., Hayman G., Jacoby L. L. Perceptual identification of visually degraded stimuli // Behavior Research Methods, Instruments, & Computers. 1986. Vol. 18. P. 1–9.

Von der Malsburg C. Binding in models of perception and brain function // Current Opinion in Neurobiology. 1995. Vol. 5. P. 520–526.

Wandell B. A. Foundations of Vision. Sunderland. MA: Sinauer Associates. 1995.

Wang G., Obama S., Yamashita W., Sugihara T., Tanaka K. Prior experience of rotation is not required for recognizing objects seen from different angles // Nature Neuroscience. 2005. Vol. 8. No. 12. P. 1568–1574.

Warrington E. K. Neuropsychological studies of object identification // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1982. Vol. 298. P. 15–33.

Warrington E., James M. Disorders of visual perception in patients with localized cerebral lesions // Neuropsychologia. 1967. Vol. 5. P. 253–266.

Warrington E., Weiskrantz L. New method of testing long-term retention with special reference to amnesic patients // Nature. 1968. Vol. 217. P. 972–974.

Watson A. B., Barlow H. B., Robson J. What does the eye see best? // Nature. 1983. Vol. 302. No. 5907. P. 419–422.

Watt R. J., Morgan M. J. Spatial filters and the localization of luminance changes in human vision // Vision Research. 1984. Vol. 24. P. 1387–1397.

Waxman S. G. Membranes, myelin, and the pathophysiology of multiple sclerosis // New England Journal of Medicine. 1982. Vol. 306. P. 1529.

Weiman C. F. R. Log-polar vision for mobile robot navigation // Electronic Imaging. 1990. P. 382–385.

Wertheimer M. Laws of Organization in Perceptual Forms. London. Harcourt. Brace&Co. 1938. P. 71–88.

Wilkins A. J., Baker A., Amin D., Smith S., Bradford J., Zaiwalla Z., Besag F. M., Binnie C. D., Fish D. Treatment of photosensitive epilepsy using coloured glasses // Seizure. 1999. Vol. 8. P. 444–449.

Wilkins A. J., Patel R., Adjamian P., Evans B. J. Tinted spectacles and visually sensitive migraine // Cephalalgia. 2002. Vol. 22. P. 711–719.

Wilkins A. J. A physiological basis for visual discomfort: application in lighting design // Lighting Research and Technology. 2016. Vol. 48. P. 44–54.

Wilkins A. J. Light right for sight: heath and efficiency in lighting practice. Proceedings of the First European Conference on Energy Efficient Lighting. Stockholm. E. Mills (ed.). 1991.

Wilkins A. J. Reading through Colour. Chichester. John Wiley and Sons. 2003.

Wilkins A. J., Allen P., Evans B. J. W. Vision and Reading Difficulties Part 4: Coloured filters — how do they work? // Optometry Today. 2009. Vol. 24. P. 30–37.

Wilkins A. J., Clark C. Modulation from fluorescent lamps // Lighting Research and Technology. 1990. Vol. 22. No. 2. P. 103–109.

Wilkins A. J., Sihra N. A colorizer for use in determining an optimal ophthalmic tint // Color Research and Applications. 2000. Vol. 263. P. 246–253.

Wilkins A. J., Sihra N., Myers A. Increasing reading speed by using colours: Issues concerning reliability and specificity, and their theoretical and practical implication // Perception. 2005. Vol. 34. P. 109–120.

Williams D. R. Topography of the foveal cone mosaic in the living human eye // Vision Research. 1988. Vol. 28. P. 433–454.

Williams D. R., Brainard D. H., McMahon M. J. [et al.] Double-pass and interferometric measurements of the optical quality of the eye // Journal of the Optical Society of America. 1994. Vol. 11. P. 3123–3135.

Wilson J. R., Sherman S. M. Receptive-field characteristics of neurons in cat striate cortex: Changes with visual field eccentricity // Journal of Neurophysiology. 1976. Vol. 39 (3). P. 512–533.

Word recommended standard procedures for the clinical measurement and specification of visual acuity. Report of working group 39. Committee on vision.

Yakimova E. G., Chizhov A. V. Experimental and Modeling Studies of Orientational Sensitivity of Neurons in the Lateral Geniculate Nucleus // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2015. Vol. 45. Issue 4. P. 465–475.

Yakimova E. G., Chizhov A. V. The processing of images in the receptive fields of the first-stage neurons of the visual system // Journal of Optical Technology. 2015. Vol. 82. Issue 10. P. 667–672.

Zachi E. C., Costa T. L., Barboni M. T., Costa M. F., Bonci D. M., Ventura D. F. Color Vision Losses in Autism Spectrum Disorders // Frontiers in Psychology. 2017. Vol. 8. Zak P. P., Ostrovsky M. A. Potential danger of light emitting diode illumination to the eye, in children and teenagers // Light & Engineering. 2012. Vol. 20. P. 5–8.

Zokai S., Wolberg G. Image registration using log-polar mappings for recovery of large-scale similarity and projective transformations // Image Processing // IEEE Transactions on Image Processing. 2005. Vol. 14. No. 10. P. 1422–1434.

Zvorykin V. K. The iconoscope — A modern version of the electric eye // Proceedings of the IRE. 1934. Vol. 22. P. 16–32.

Zvorykin V. K. Iconoscopes and kinescopes in television // RCA Review. 1936. Vol. 1. P. 60–84.

Zvorykin V. K. Automatic recording spectroradiometer for cathodoluminescent materials // Journal of the Optical Society of America. 1939 a. Vol. 29. February. P. 84–91.

Zvorykin V. K. The electrostatic electron multiplier // Proceedings of the IRE. 1939 b. Vol. 27. September. P. 558–566.

Zvorykin V. K., Flory L. R. An Electronic Reading Aid to the Blind. 1946 // Proceedings of the American Philosophical Society. 1947. Vol. 91. No. 2.

Шелепин Юрий Евгеньевич

ВВЕДЕНИЕ В НЕЙРОИКОНИКУ

Научное издание

Ведущий редактор	*В. Лаврова*
Литературный редактор	*О. Кувакина*
Художественный редактор	*В. Зассеева*
Верстка	*Т. Петрова*
Корректор	*М. Одинокова*

Подписано в печать 25.12.17
Формат 60 × 88/16. Бумага офсетная
Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная. Усл. п. л. 22
ООО «ИТК Троицкий мост» тел.: (812) 904-45-24 www.trmost.com
Отпечатано с готовых диапозитивов в типографии ООО «Лесник-Принт»
Санкт-Петербург, ул. Сабировская, д. 37.